

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Сибирский суперкомпьютерный центр ИВМиМГ СО РАН



**ИНГГ**  
СО РАН



Научный семинар

**Теоретическое обоснование**

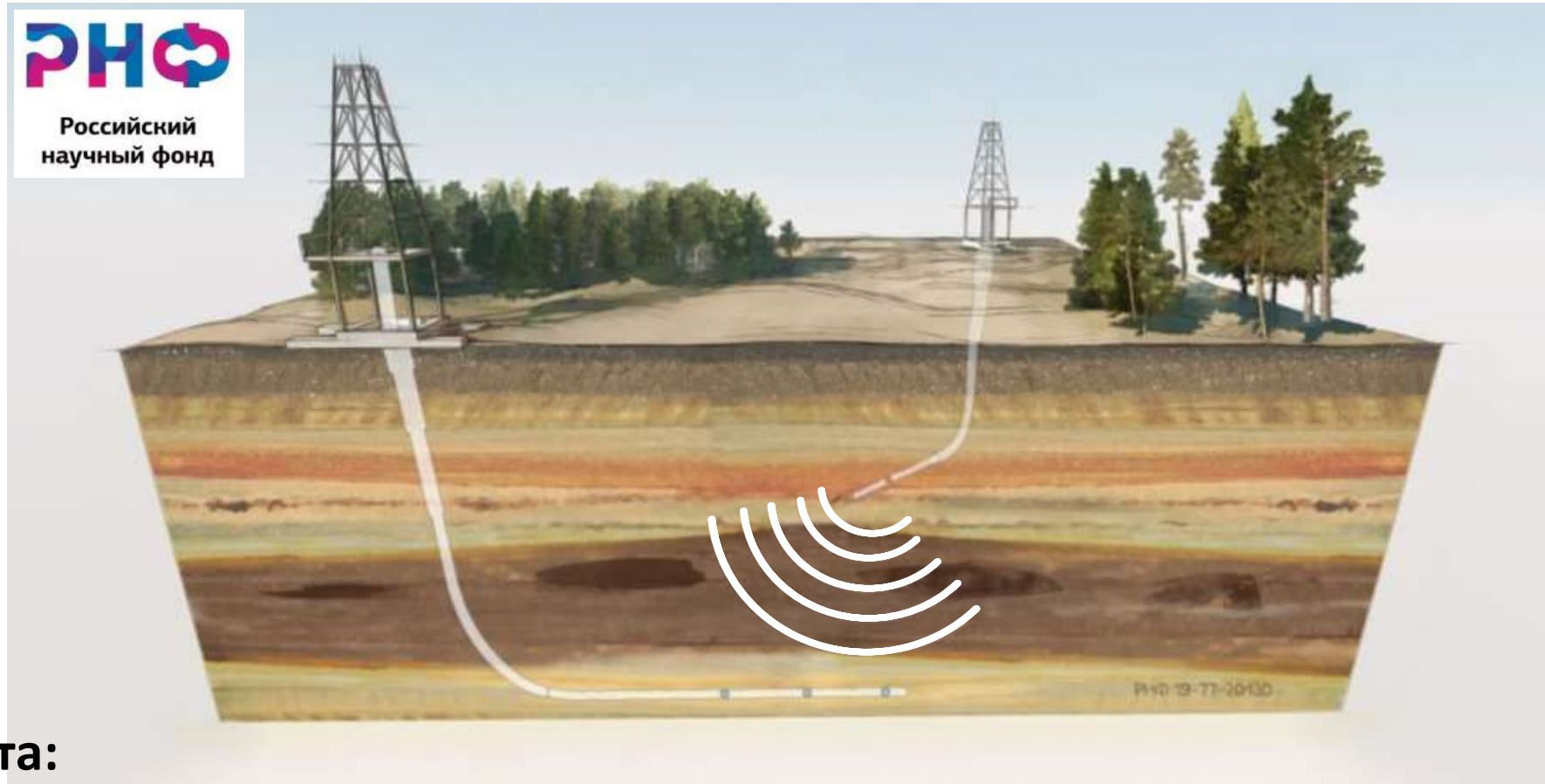
**импульсного электромагнитного межскважинного зондирования  
с использованием вычислительных ресурсов ССКЦ СО РАН**

Докладчик:

Глинских Вячеслав Николаевич  
чл.-к. РАН, д.ф.-м.н.

г. Новосибирск, 25 марта 2021

**Фундаментальные основы импульсного электромагнитного зондирования с управляемым спектром: теоретическое обоснование инновационного геофизического метода геологоразведки с использованием высокопроизводительных вычислений на базе Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН**



**Идеи проекта:**

- Принципиально новое направление геологоразведки в изучении баженовской свиты;
- Картирование и латеральная локализация нефтеперспективных отложений;
- Пространственно-распределённая система наклонно-горизонтальных скважин.

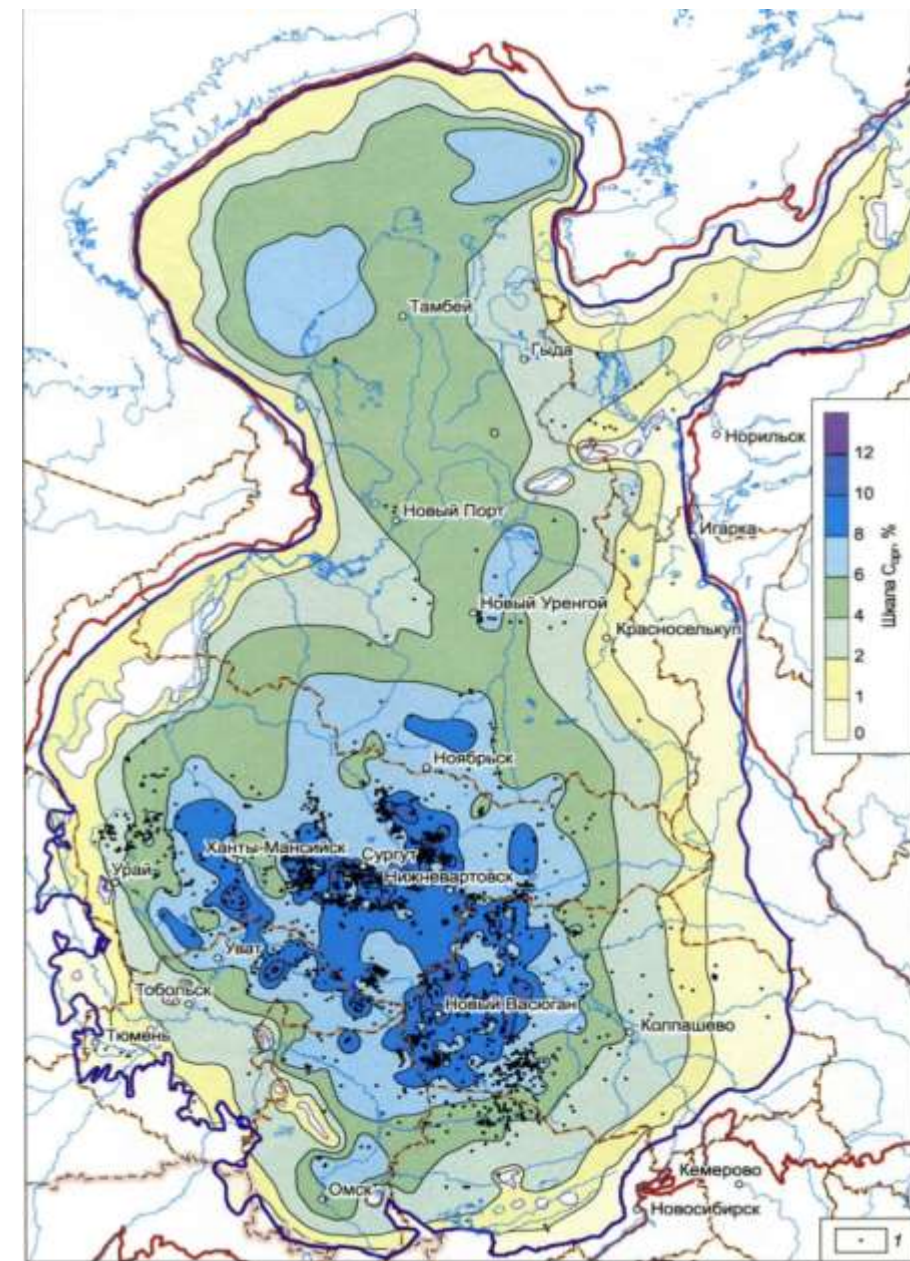
# Задачи проекта

- 1. Создание программно-алгоритмической базы высокопроизводительного численного моделирования электромагнитных зондирований методом переходных процессов с токовым импульсом с заданной спектральной характеристикой в вертикальных и наклонно-горизонтальных скважинах применительно к изучению межскважинного пространства для определения пространственного расположения границ пластов баженовской свиты.**
- 2. Оптимальное проектирование и научное обоснование параметров и конфигурации новой зондирующей установки с управляемым спектром на основе масштабного численного моделирования в реалистичных моделях с использованием Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН и создание алгоритмов инверсии данных для детального изучения в масштабе реального времени пространственно неоднородной баженовской свиты с использованием системы наклонно-горизонтальных скважин.**
- 3. Реализация и апробирование комплексов быстрых программ обработки и интерпретации данных нового метода электромагнитных зондирований и разработка методического обеспечения новой технологии детального изучения и картирования латерально неоднородной баженовской свиты из наклонно-горизонтальных скважин с помощью параллельных вычислений на суперкомпьютерах.**

# Баженовская свита — главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в Западной Сибири

- Основной источник углеводородов в Западной Сибири.
- Распространена на территории около **1 млн км<sup>2</sup>**.
- Региональный **флюидоупор** и на ряде площадей - **коллектор**.
- По разным оценкам за 2012-2017 гг., извлекаемые **запасы нефти составляют от 22 млрд до 360 млрд баррелей**
- **Многокомпонентный состав** пород - глинистые, карбонатные, силикатные минералы, органическое вещество и пирит.
- **Разнородное строение** разреза — большое количество литологических типов пород и их высокая пространственная неоднородность.
- **Высокое содержание органического вещества** — важнейшего показателя для оценки продуктивности сланцевых коллекторов.

**Средние концентрации органического вещества в баженовской свите возрастают от 2-4 % по периферии бассейна до 10-12 % в его центральной части.**



Карта средних концентраций органического углерода в породах баженовского горизонта на территории Западной Сибири, % [Конторович и др., 2018]

# Многокомпонентный состав пород баженовской свиты

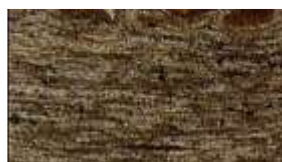
## Основные литологические типы пород

Кремнистые минералы	Глинистые минералы	Карбонатные минералы
---------------------	--------------------	----------------------



силициты

>50%	-	-
------	---	---



аргиллиты

-	>50%	-
---	------	---



карбонаты

-	-	>50%
---	---	------

Кремнистые минералы	Глинистые минералы	Карбонатные минералы
---------------------	--------------------	----------------------



микситы глинисто-кремнистые

25-50%	25-50%	<25%
--------	--------	------



миксты карбонатно-кремнистый

25-50%	<25%	25-50%
--------	------	--------



микситы карбонатно-глинистые

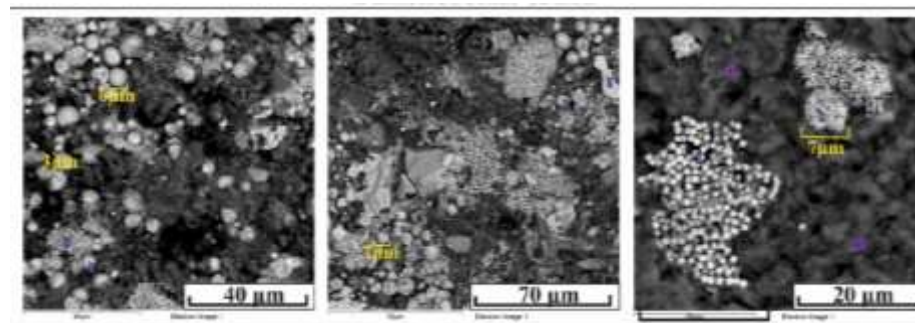
<25%	25-50%	25-50%
------	--------	--------

По современным представлениям, свита сложена из карбонатных глинистых и кремнистых пород. Основные породообразующие компоненты представлены **кремнистыми, глинистыми, карбонатными минералами и органическим веществом.**

Общее содержание органического вещества: 14 %

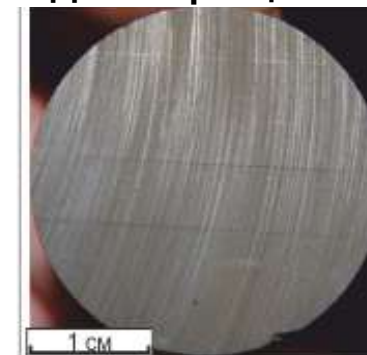
Минерального вещества: 85 %

Источником органического вещества являются останки планктона с кремневым скелетом.



Шлиф. Франбуиды пирита (минерала с низким удельным сопротивлением) в породах баженовской свиты

До экстракции

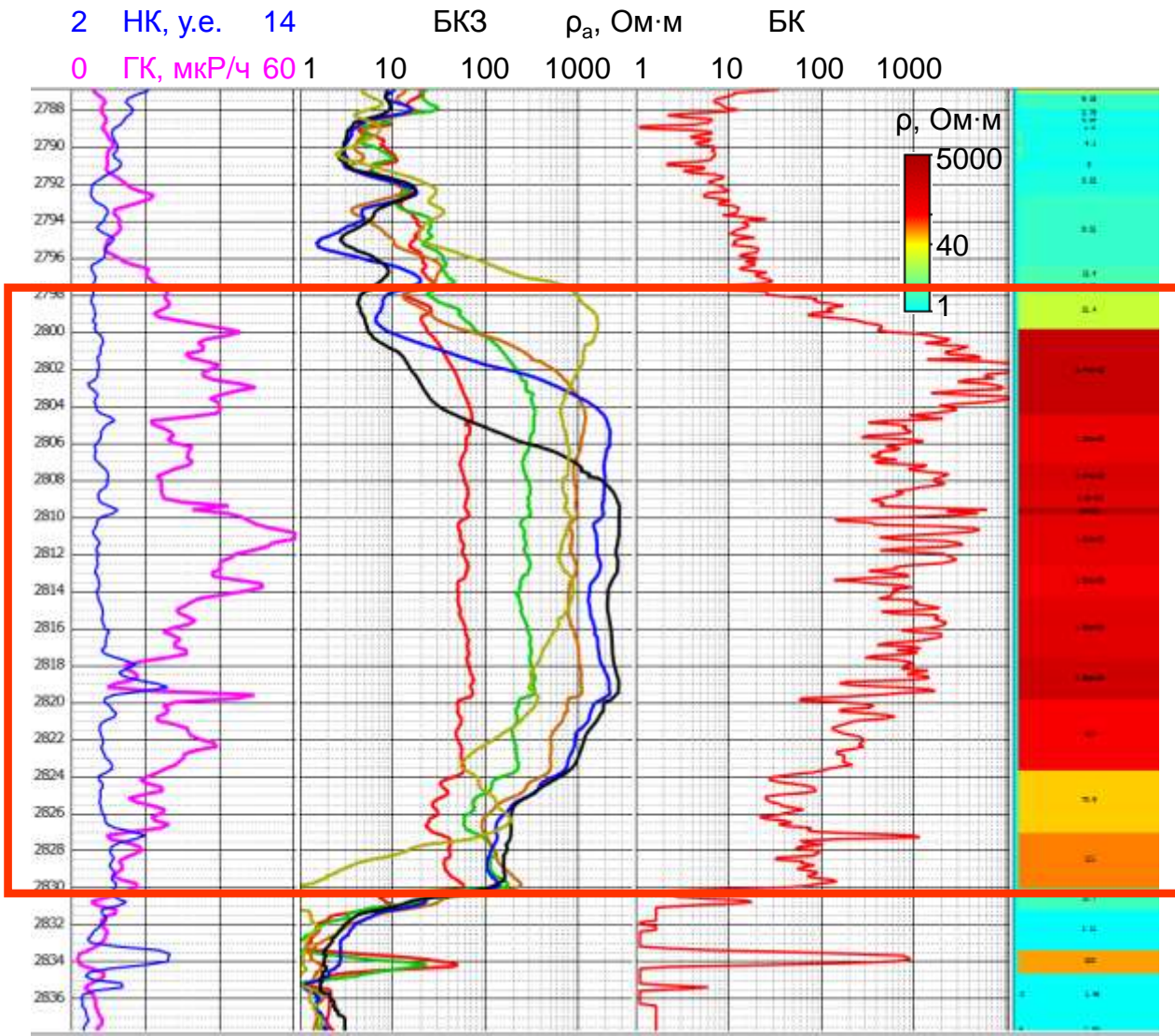


После экстракции



Керн баженовской свиты

# Электрические свойства баженовской свиты по данным электрокаротажа



- Интервал баженовской свиты определяется по высокой естественной гамма-активности (ГК)
- Мощность высокоомной части 20–40 м
- Значения УЭС по данным каротажа – сотни-тысячи Ом·м
- Породы свиты гидрофобны
- Минеральный состав:

кварц  
карбонат  
кероген (твердое ОБ)

УЭС > 10<sup>3</sup> Ом·м  
ε ≈ 2-6

глинистые минералы

УЭС ≈ 5–20 Ом·м  
(при содержании H<sub>2</sub>O)  
ε ≈ 10–200

ε ЗАВИСИТ ОТ ЧАСТОТЫ

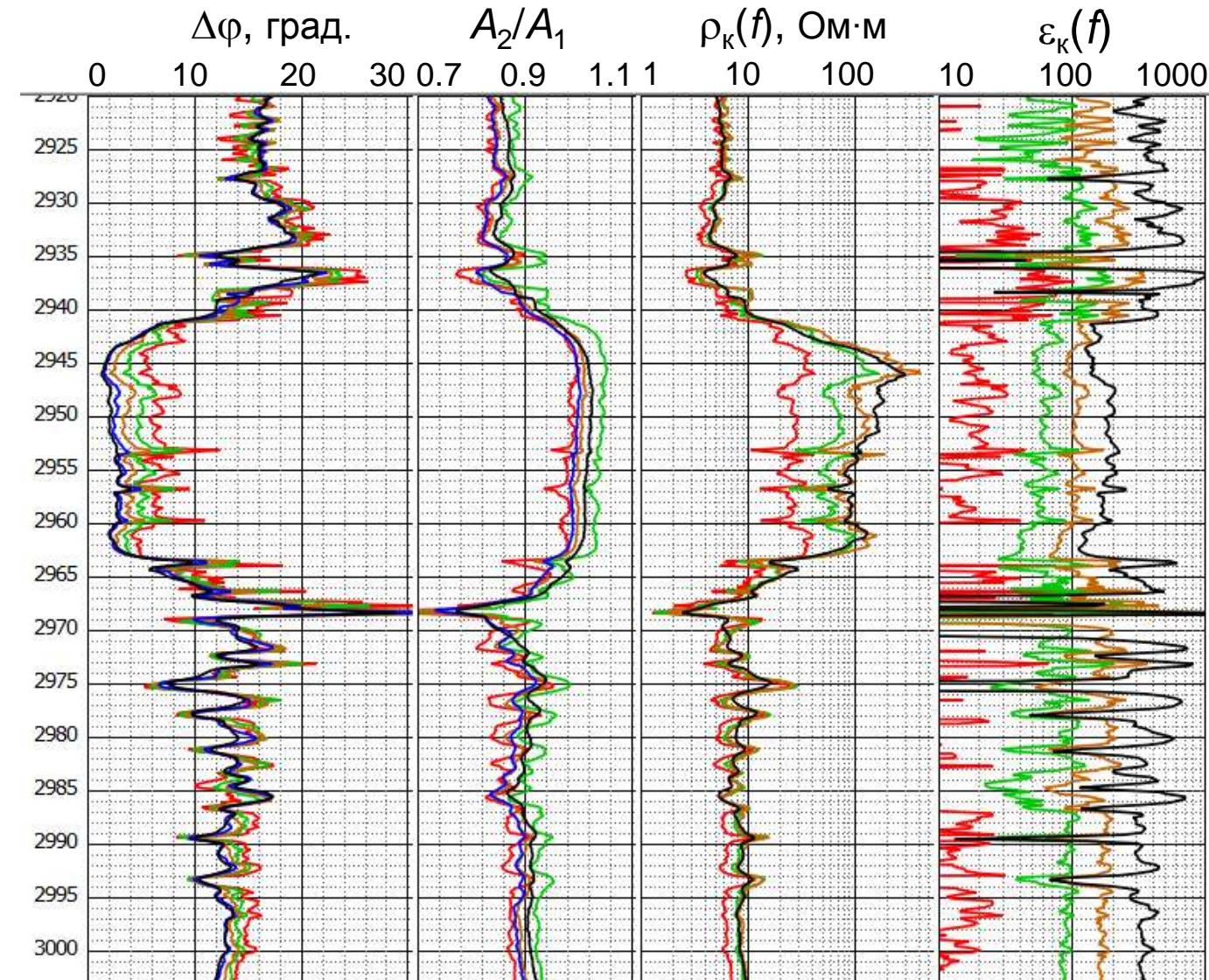
рассеянный пирит

УЭС < 10<sup>-1</sup> Ом·м  
ε ≈ 40–80

Салымское месторождение

# Электрические свойства высокоомной баженовской свиты (большое содержание ОВ) Частотная дисперсия по данным ВЭМКЗ

В диапазоне частот 0.875-14 МГц



Типы пород	$\rho$ , Ом·м	$\varepsilon$	БК, Ом·м
аргиллиты (вмещающие)	10-20	100-500	80
силициты	100-250	30-150	700
карбонаты	200-400	20-100	1500
микститы глин-кремн	30-80	80-290	400
микститы карб-глин	70-200	50-210	500
микститы карб-кремн	150-300	20-90	1200

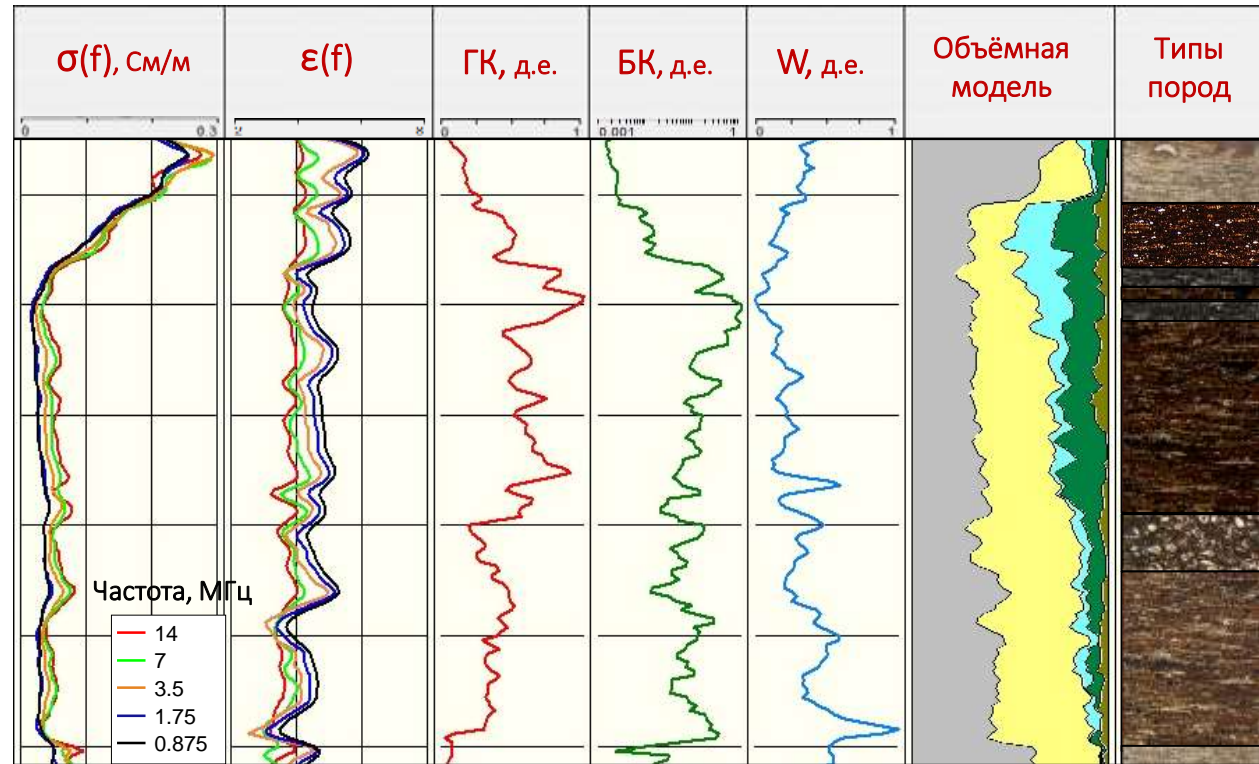
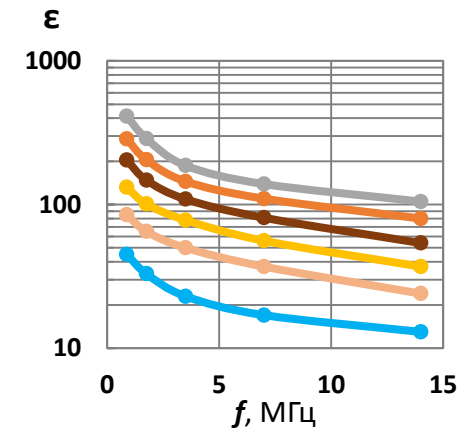
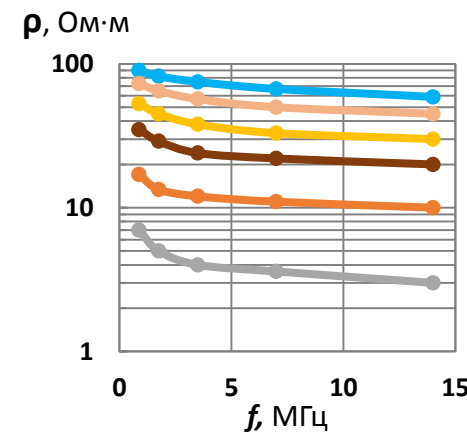
Значения  $\sigma$  и  $\varepsilon$  зависят от содержания в составе породы органического вещества, глинистых минералов и пирита

# Особенности электрических свойств баженовской свиты

**Анизотропия УЭС** – обусловлена трещиноватостью и слоистостью пород



**Частотная дисперсия** – следствие разницы свойств составляющих породы минералов



Породообразующие компоненты:

- глинистые минералы
- кремнистые минералы
- карбонатные минералы
- органическое вещество
- пирит

Основные литологические типы:



аргиллиты



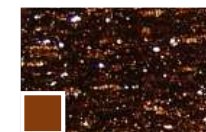
силициты



карбонаты



микситы  
глинисто-кремнистые



микситы  
карбонатно-глинистые

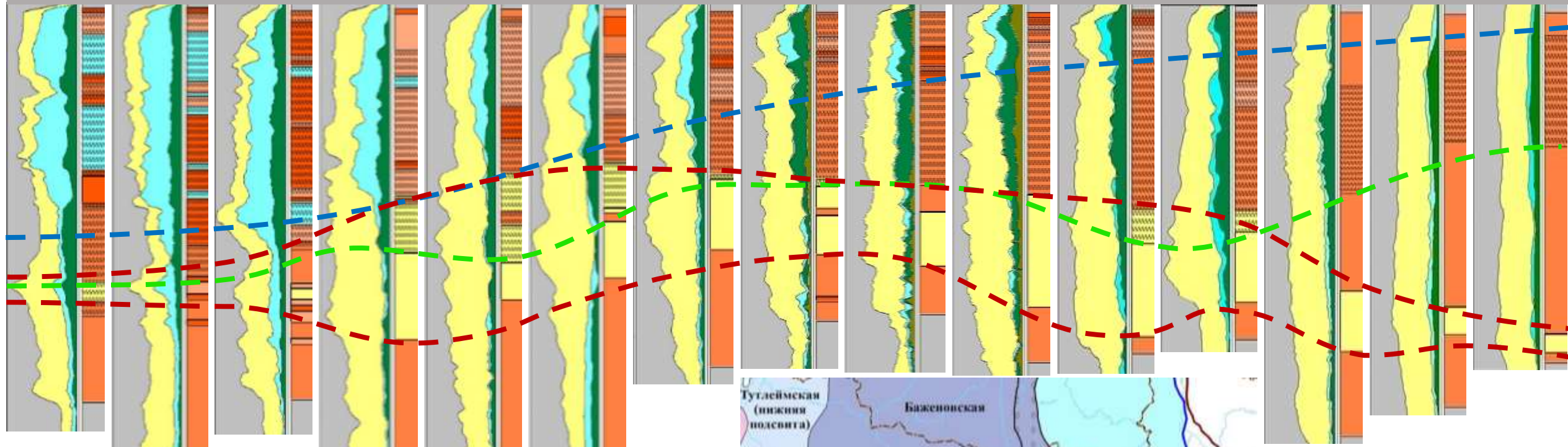


микст карбонатно-  
кремнистый

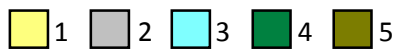


# Корреляционная схема баженовской свиты по данным ГИС

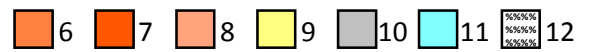
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15



## Породообразующие компоненты

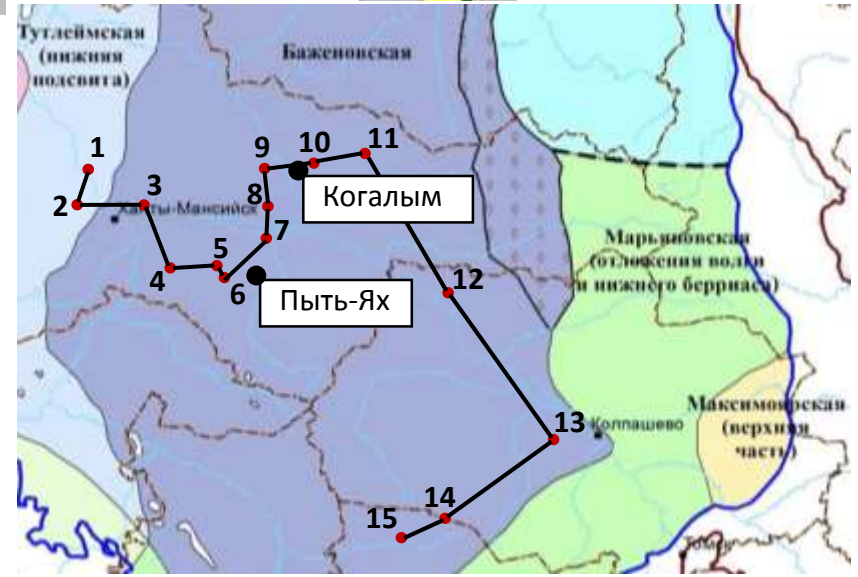


## Основные литологические типы



1 – кремнистые минералы, 2 – глинистые минералы, 3 – карбонатные минералы, 4 – органическое вещество, 5 – пирит, 6 – глинисто-кремнистые микститы, 7 – карбонатно-глинистые микститы, 8 – карбонатно-кремнистые микститы, 9 – силициты, 10 – аргиллиты, 11 – карбонаты, 12 – высокоуглеродистые породы.

--- граница пачки с кремнистым материалом    --- подошва пачки с повышенным содержанием ОВ    --- подошва пачки с карбонатным материалом



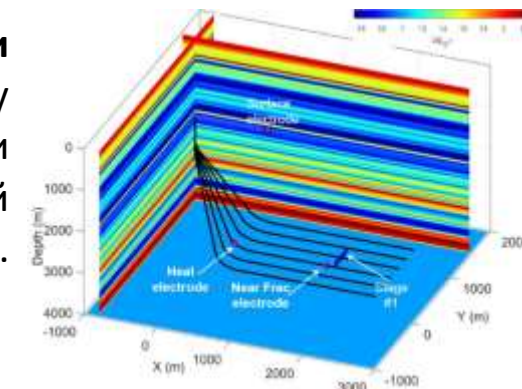
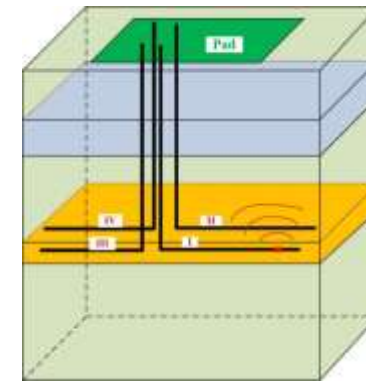
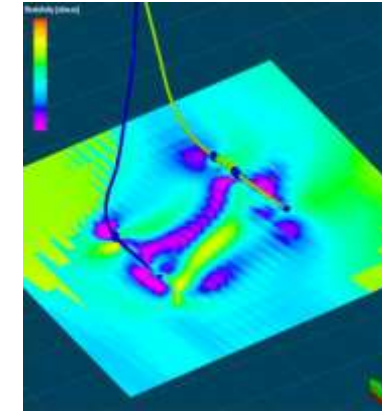
# Межскважинное электропросвечивание из горизонтальных скважин

Очень немного публикаций по межскважинному просвечиванию из горизонтальных скважин, все – зарубежные. Их авторы – из **крупнейших нефтяных компаний** Chevron, Saudi Aramco, Schlumberger, Weatherford и **университетов США** (Университет Юты, Хьюстонский университет).

1. [Marsala et al., 2015]. **Разделение нефте- и водонасыщенных интервалов** в карбонатном трещиноватом коллекторе (Саудовская Аравия) между двумя субпараллельными горизонтальными скважинами на расстоянии 1.3 км. Низкочастотное электромагнитное зондирование (частота 91 Гц). **Проведённое межскважинное просвечивание** из далеко расположенных горизонтальных скважин – «первое в своём роде в нефтегазовой индустрии».

2. [Zeng, Dong, Chen, 2017]. **Межскважинная электромагнитная телеметрия** при кустовом бурении (Северная Америка). Необсаженная (с источником) и обсаженная (приёмник) горизонтальные скважины на расстоянии 153 м. Низкочастотное электромагнитное зондирование. **Значительная экономия времени и затрат**.

3. [Hoversten, Schwarzbach, 2018]. Прямой метод картирования пропанта для **оценки объёма трещины гидроразрыва пласта**, как альтернатива традиционному микросейсмическому мониторингу. Наземно-скважинная система в присутствии стальной колонны. 6 наклонно-горизонтальных обсаженных скважин из одной буровой площадки, горизонтальные участки на расстоянии около 200 м (Северная Америка). Зондирование методом переходных процессов. **Достигается точность до 20%**.



# Классическая система разработки месторождения кустовым способом (Сургутское м/р)



## Геометрические характеристики скважин:

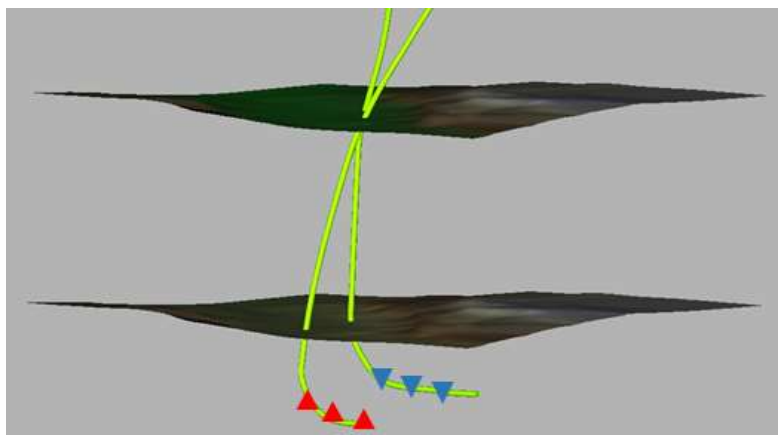
- Вертикальные глубины 2500–3000 м;
- Диаметры 0.1524 – 0.2207 м;
- Вертикальные / горизонтальные / S- и J- образные профили;
- Длины горизонтальных участков: 300–800 м;
- Расстояние между устьями ~10 м;
- Расстояние между забоями – от 100 м;
- Расстояние между горизонтальными участками ~ 200-400 м.

## Электрофизические характеристики:

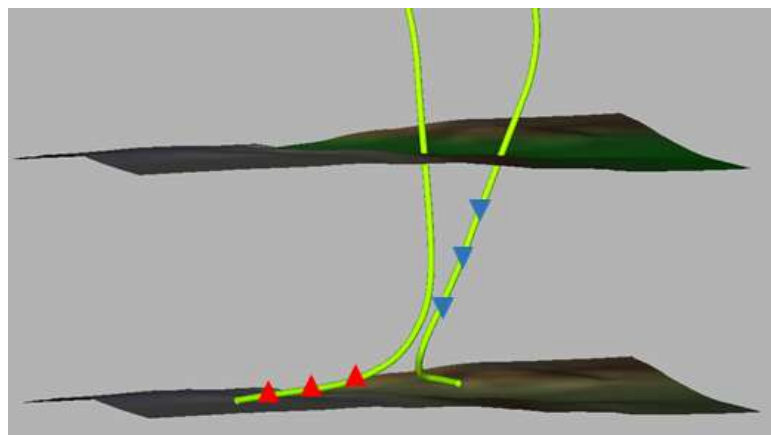
- УЭС промывочной жидкости: 0.01–100 Ом·м;
- УЭС отложений: десятки – тысячи Ом·м.

# Варианты размещения ЗУ относительно границ баженовской свиты

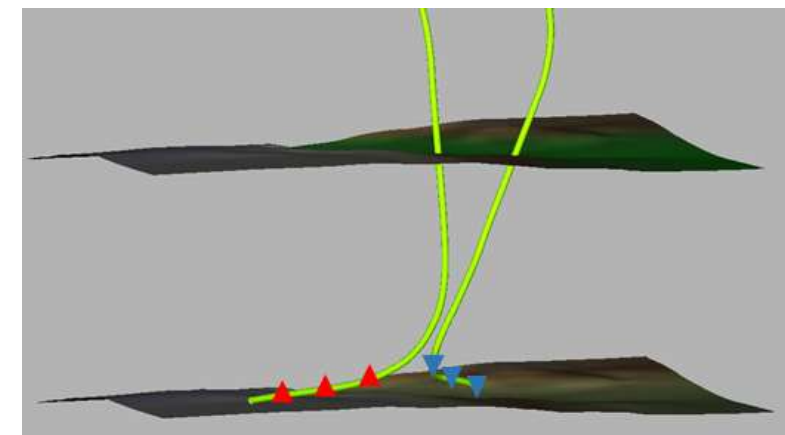
1. Каротажные измерения в одной скважине
2. Различные зондирующие установки, расположенные в двух наклонно-направленных скважинах (межскважинное просвечивание)



Зондирование из нижележащего нефтеносного горизонта



Зондирование изнутри БС:  
наклоненная ЗУ

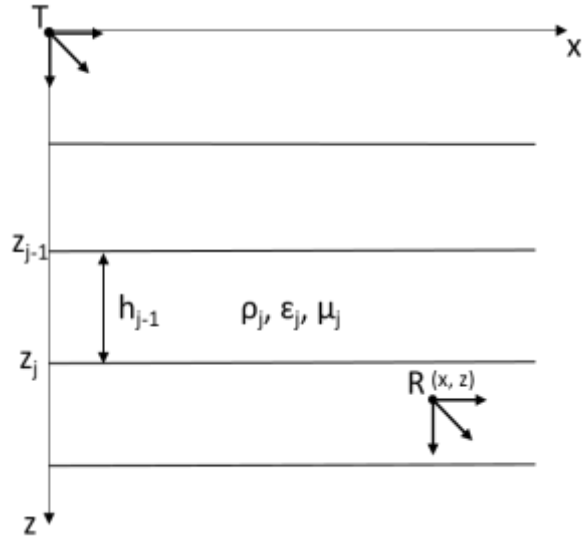


Зондирование изнутри БС:  
горизонтальная ЗУ

▲ - источник    ▼ - приемник

# Теория: моделирование сигналов

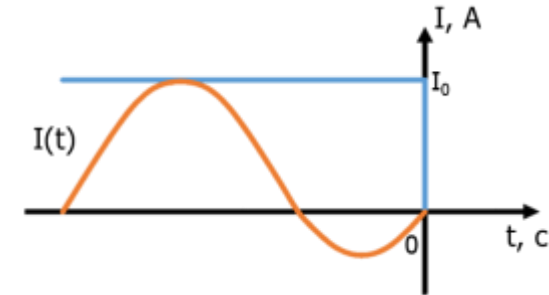
## Базовая модель среды



## Уравнения Максвелла

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}^e, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{j} = 0, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0. \end{cases}$$

## Импульс тока



$$\vec{j}^e = I(t) \cdot U(x, y, z) \cdot \vec{i}$$

## Зондирующая установка:

- Трехкомпонентные генераторные и приемные катушки. Базовые компоненты – ZZ, XX, YY, ZX, XZ
- Суммарный момент генераторной и приемной катушек –  $100 \text{ A} \cdot \text{м}^4$
- Расстояние между источником и приемником – от первых метров до нескольких сотен метров
- Времена регистрации сигналов от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$  с
- Погрешность – 10 нВ

# Теория: моделирование сигналов

## Представление электромагнитного поля

$$\vec{F}^I(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{F}^{\delta*}(\omega) I^*(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

э.д.с. от произвольного импульса тока

$$\vec{F}^{1-\theta}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{F}^{\delta*}(\omega) \frac{1}{i\omega} e^{-i\omega t} d\omega$$

э.д.с. от прямоугольного импульса тока

$$\vec{F}^I(t) = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{F}^{1-\theta}(\tau) I(t-\tau) d\tau$$

э.д.с. от произвольного импульса тока через  
э.д.с. от прямоугольного импульса тока

### Преимущества метода по сравнению с частотными зондированиями:

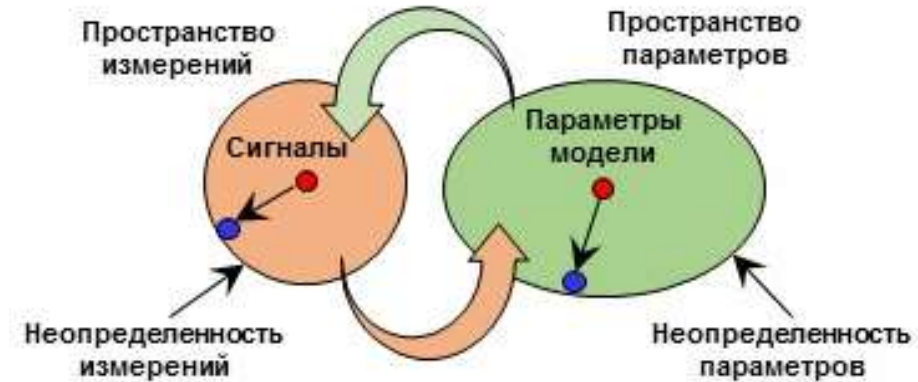
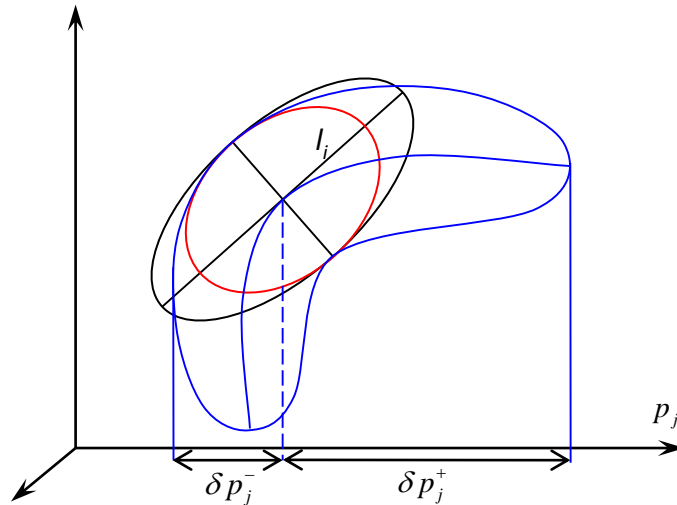
- широкий временной диапазон измерения сигнала (глубинность)
- отсутствие прямого поля
- различные токовые импульсы в зависимости от решаемой задачи
- представление сигнала в виде непрерывной кривой

# Теория: анализ чувствительности

## Разрешающая способность системы наблюдений:

- Оптимальный выбор набора сигналов для решения конкретной задачи
- Оценка неопределенности для найденных в результате инверсии параметров модели

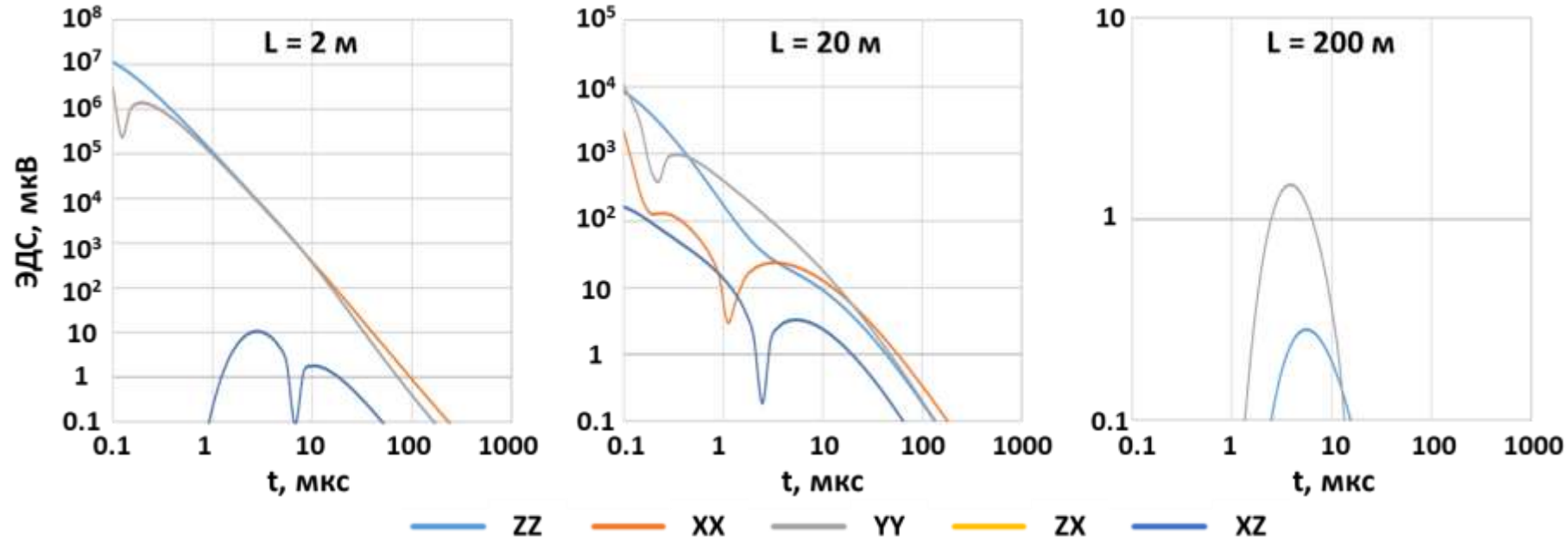
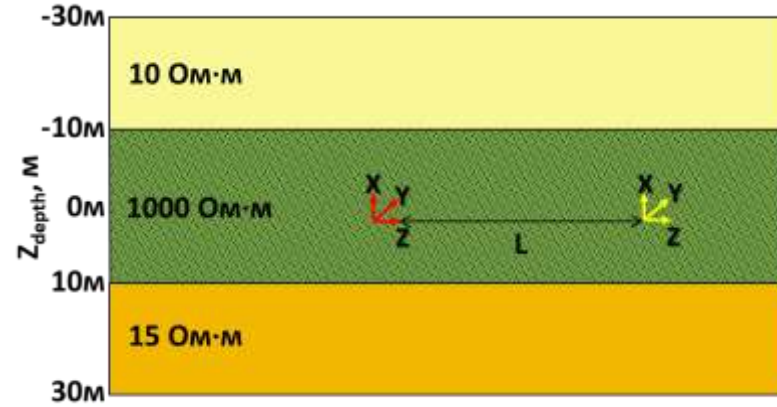
- Линейный и нелинейный подходы
- Учет допустимого изменения известных параметров
- Случайные и систематические ошибки измерений



$$\frac{1}{R} \delta \vec{f}^T \cdot \hat{\Sigma}^2 \cdot \delta \vec{f} = 1 \Rightarrow \delta \vec{p}^T \hat{V} \hat{\Lambda} \hat{V}^T \delta \vec{p} = 1$$

# Характерные сигналы электромагнитного зондирования

Геоэлектрическая модель БС

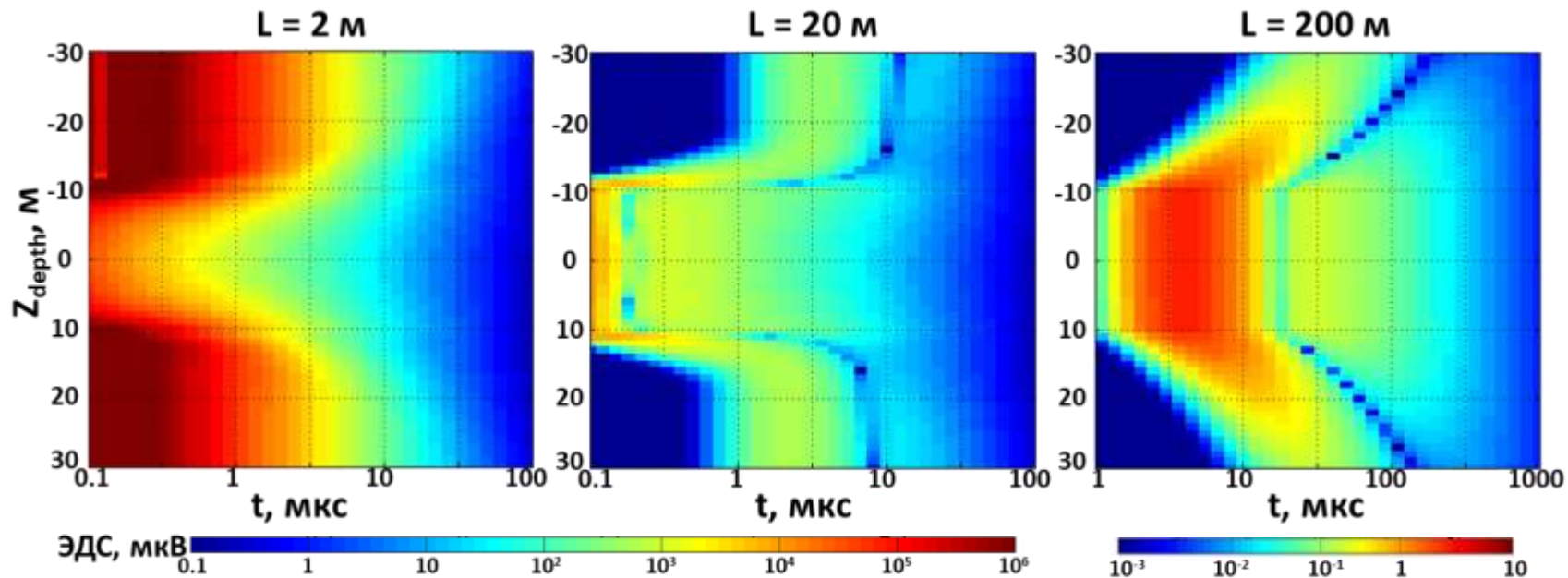
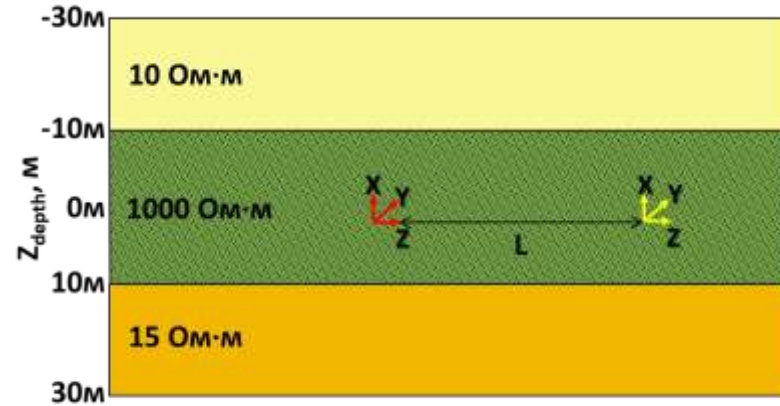


- Высокий уровень сигналов электромагнитного зондирования
- Независимость сигналов разных компонент электромагнитного поля



# Определение положения кровли и подошвы БС

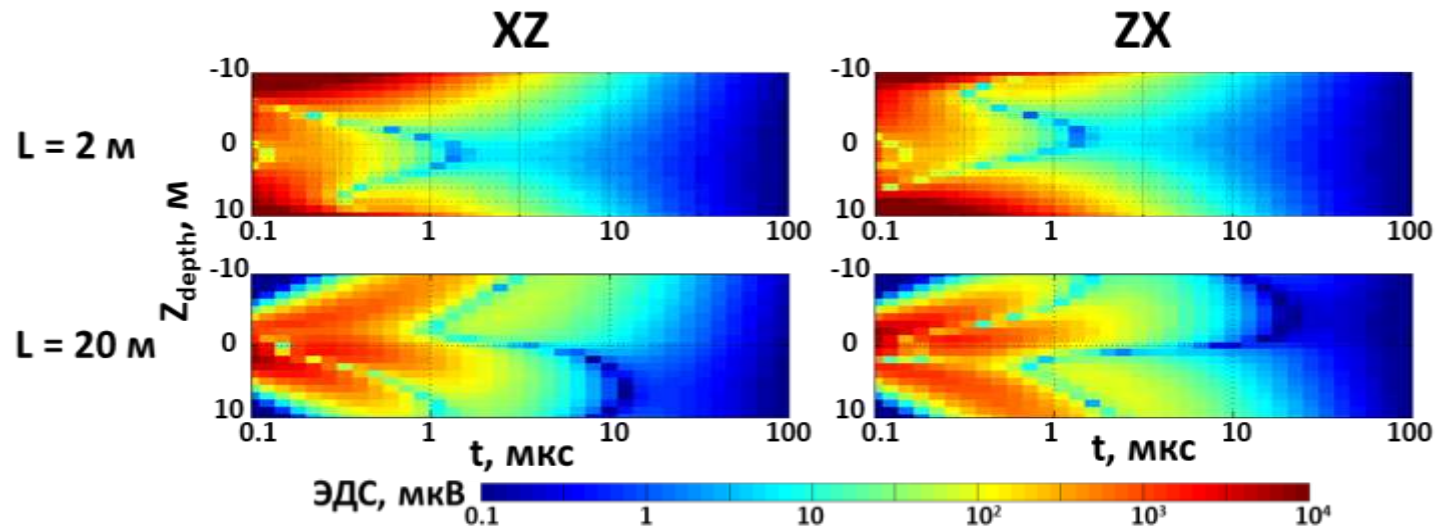
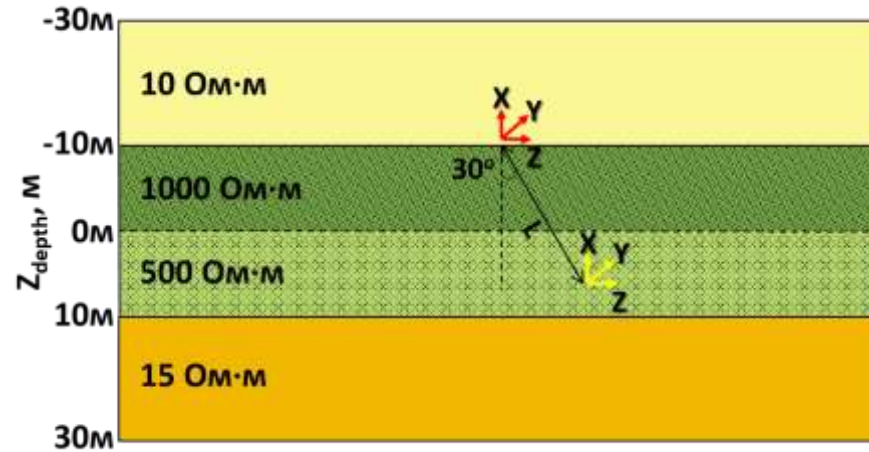
Геоэлектрическая модель БС



- Возможность определения положения границ БС в большом диапазоне расстояния между источником и приемником

# Чувствительность сигналов к внутренним неоднородностям БС

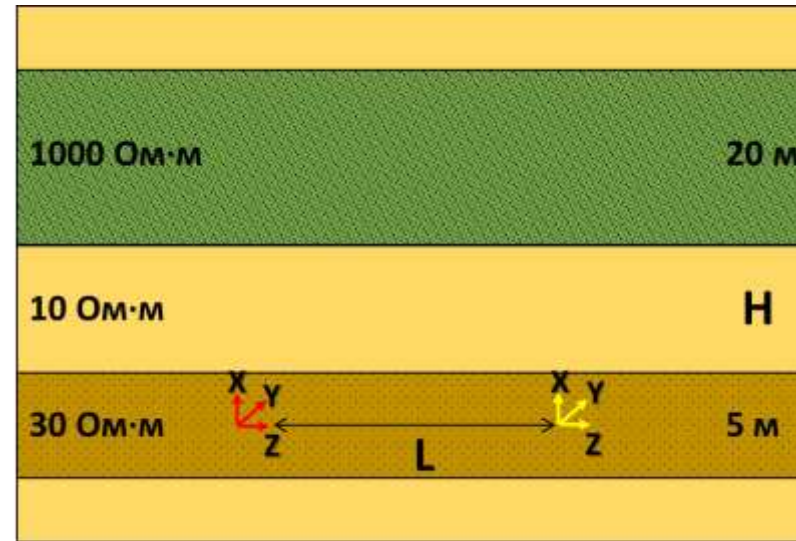
Геоэлектрическая модель БС с внутренней границей



- Высокая чувствительность перекрестных компонент к внутренним неоднородностям БС

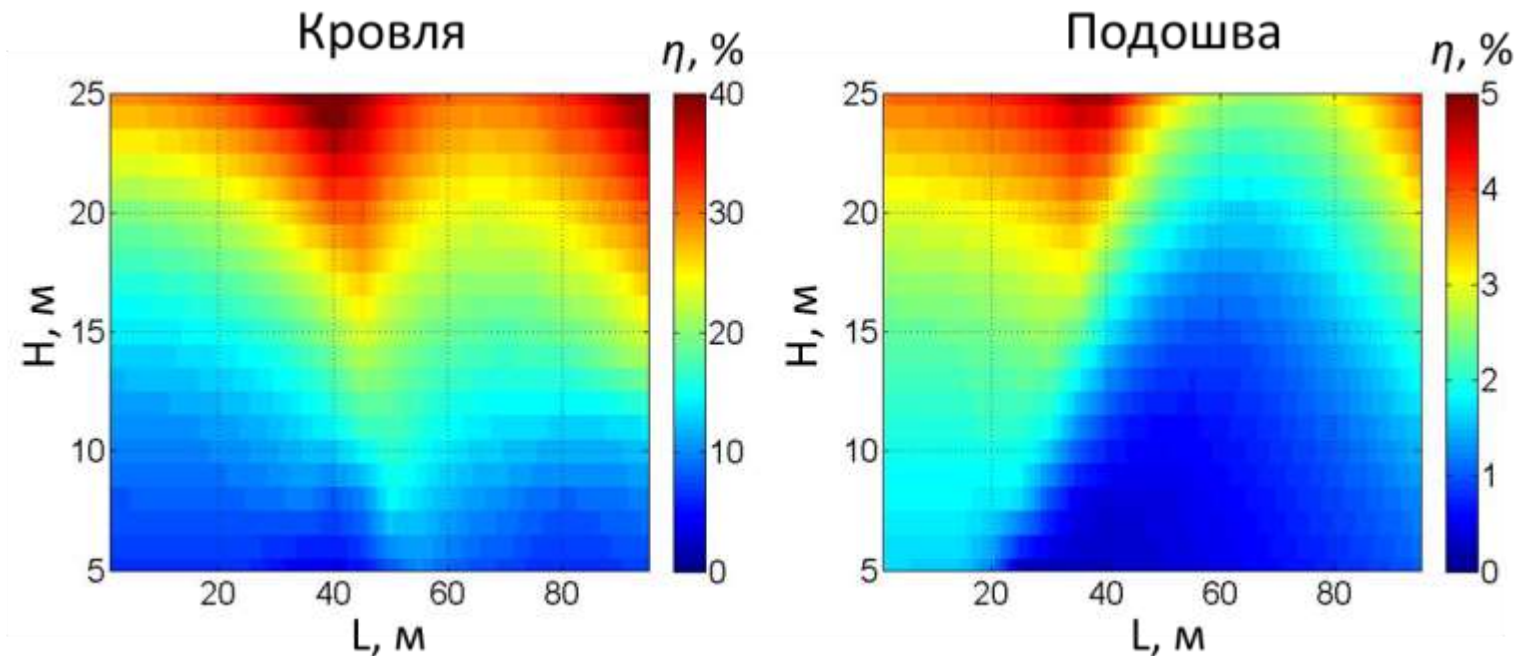
# Относительная погрешность определения положения границ БС

Зондирование из интервала  
нижезалегающего  
нефтеносного коллектора



## Модель ошибки измерений

- Момент катушек:  $100 \text{ А} \cdot \text{м}^4$
- Относительная погрешность: 2%
- Абсолютная погрешность: 10 нВ



## Относительная погрешность определения положения:

- подошвы БС – менее 5 %  
в широком диапазоне H и L;
- кровли БС при  $H < 10 \text{ м}$  – до 10 %, при  $H = 20\text{-}25 \text{ м}$  – 20-40 %  
в широком диапазоне L.

# Картирование и межскважинное просвечивание баженовской свиты из нижнемеловых и юрских коллекторов (Восточно-Сургутское м-ние)

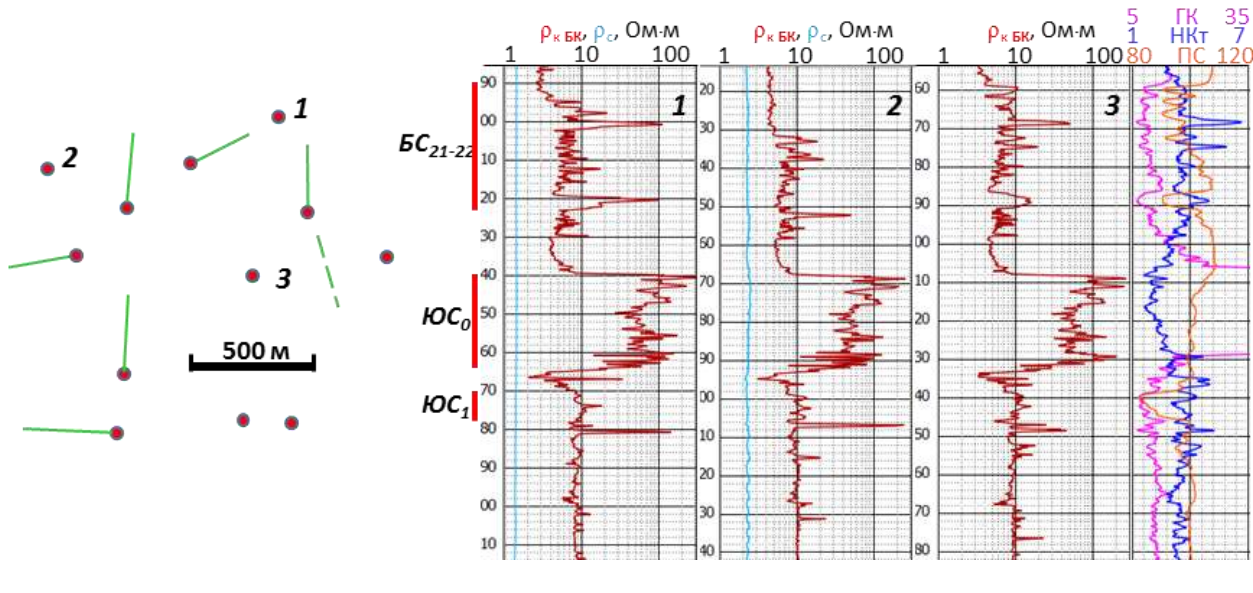
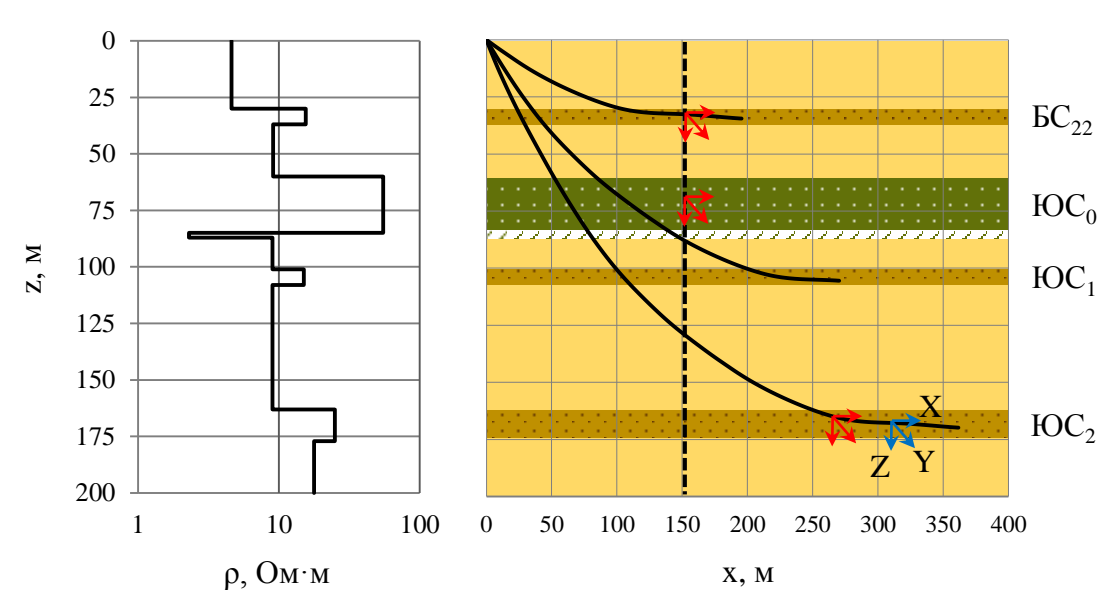
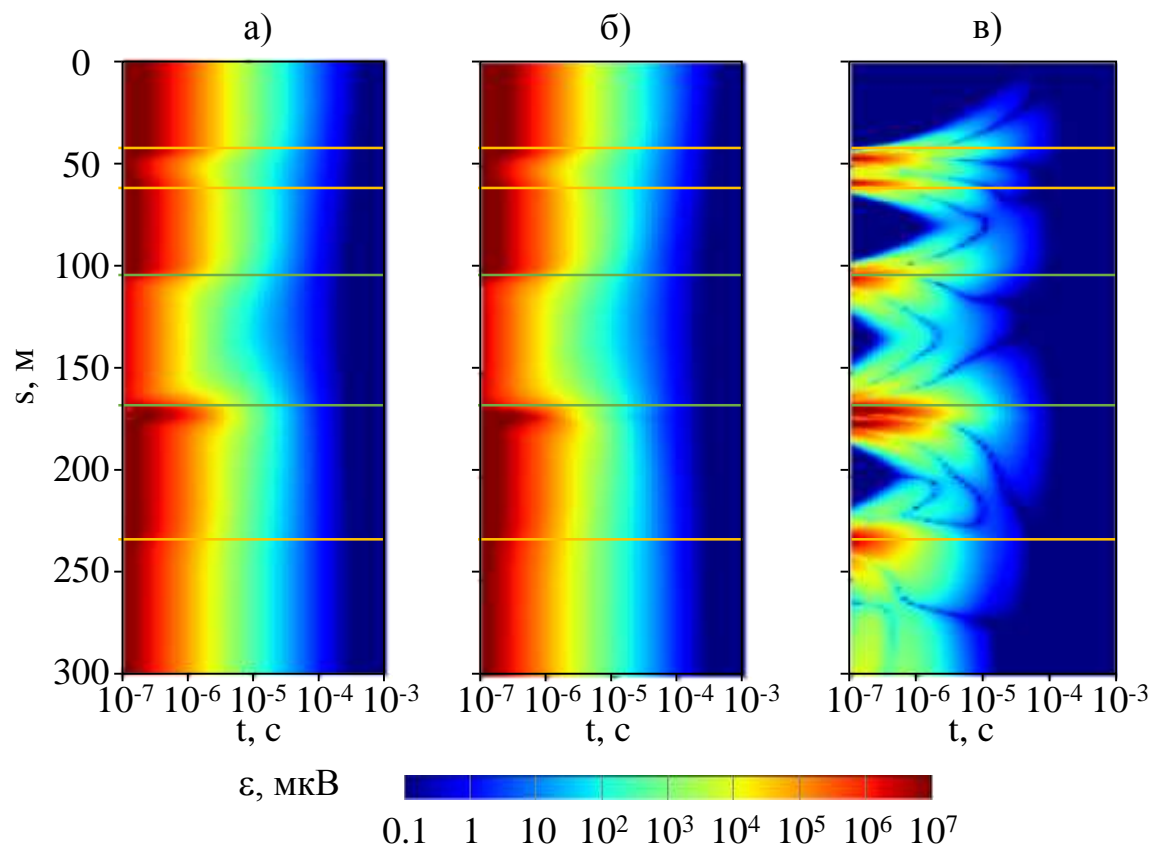


Схема расположения вертикальных и наклонно-горизонтальных стволов одного из кустов Восточно-Сургутского месторождения (слева), вскрывающих коллектор ЮС<sub>2</sub>. Красными точками показано положение входа в коллектор, зелеными линиями – горизонтальные стволы в коллекторе).

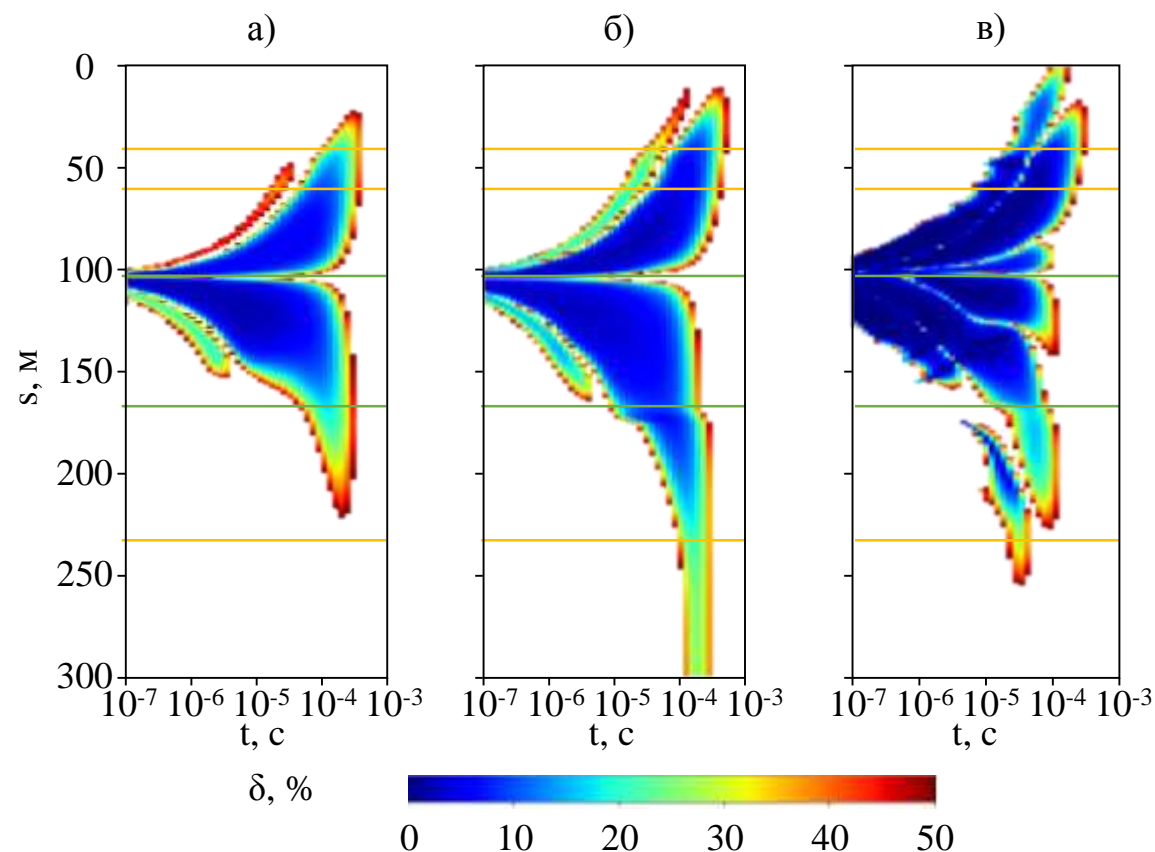


Обобщенная изотропная геоэлектрическая модель пластов разреза. Цветовые обозначения: желтый – глинистые породы и аргиллиты, зеленый – бажениты ЮС<sub>0</sub>, коричневый – коллекторы BC<sub>22</sub>, ЮС<sub>1</sub> и ЮС<sub>2</sub>, серый – глины георгиевской свиты. Глубина отсчитывается от условной точки. Сплошными линиями показаны траектории наклонно-горизонтальных скважин, пунктирной – вертикальной скважины.

# Импульсное электромагнитное зондирование баженовской свиты из наклонной скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС<sub>1</sub>

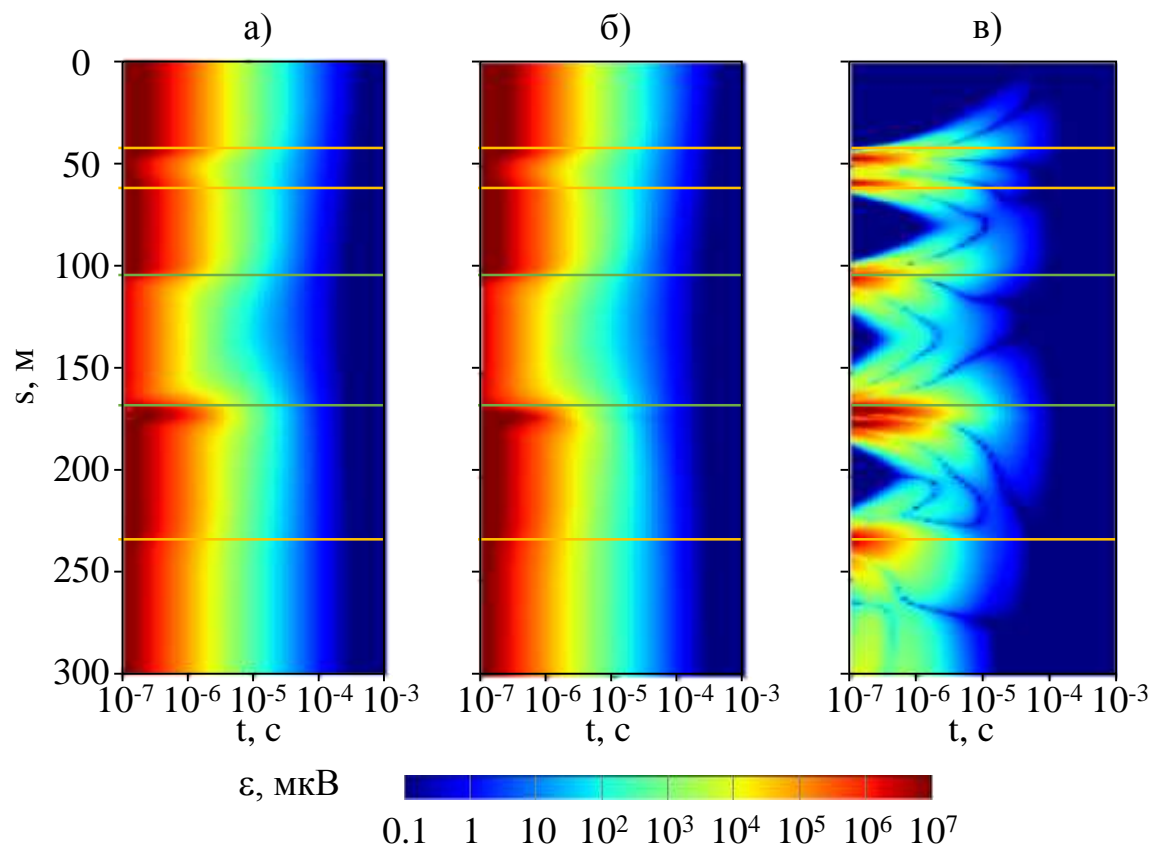


Э.д.с. (мкВ) для ХХ- (а), ZZ- (б) и ZX- (в) компонент в зависимости от времени и от положения зонда вдоль траектории при импульсном электромагнитном зондировании баженовской свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС<sub>1</sub>.

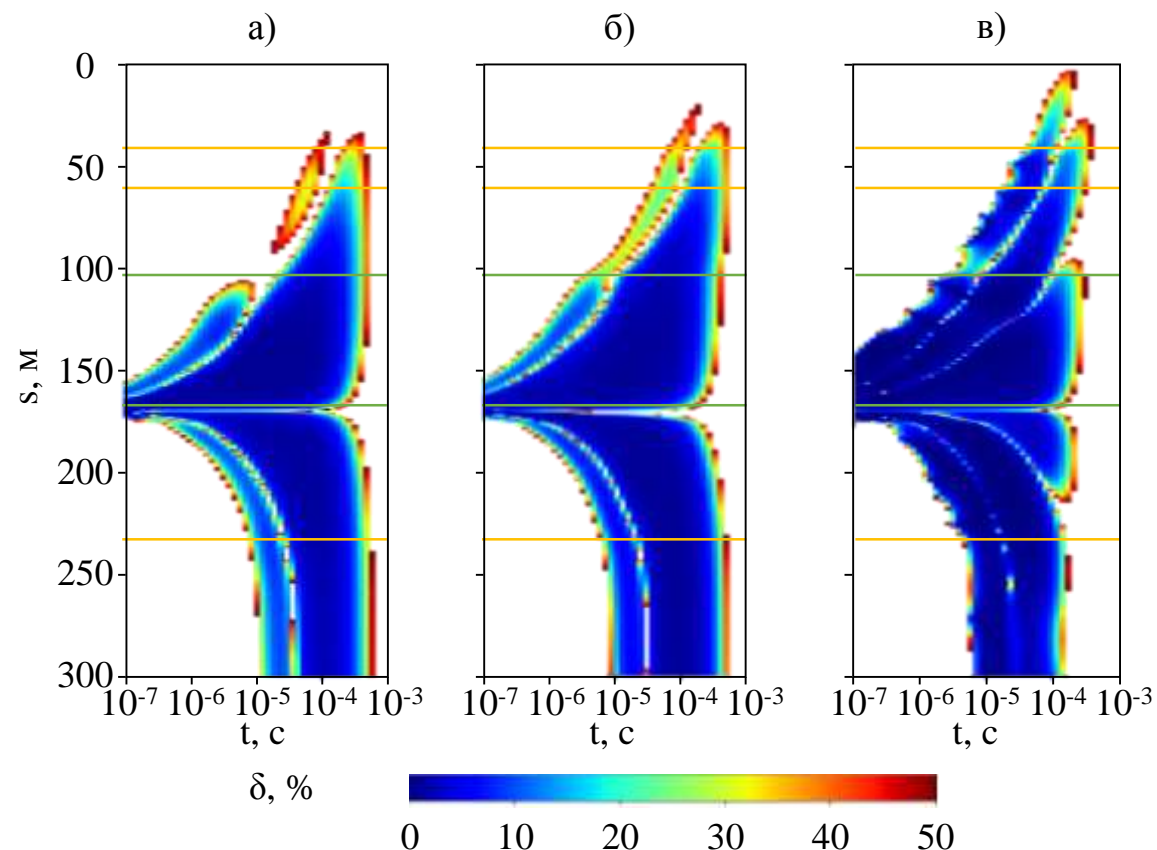


Относительная ошибка определения положения кровли баженовской свиты для ХХ- (а), ZZ- (б) и ZX- (в) компонент поля в зависимости от времени и от положения зонда вдоль траектории при импульсном электромагнитном зондировании свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС<sub>1</sub>.

# Импульсное электромагнитное зондирование баженовской свиты из наклонной скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС<sub>1</sub>

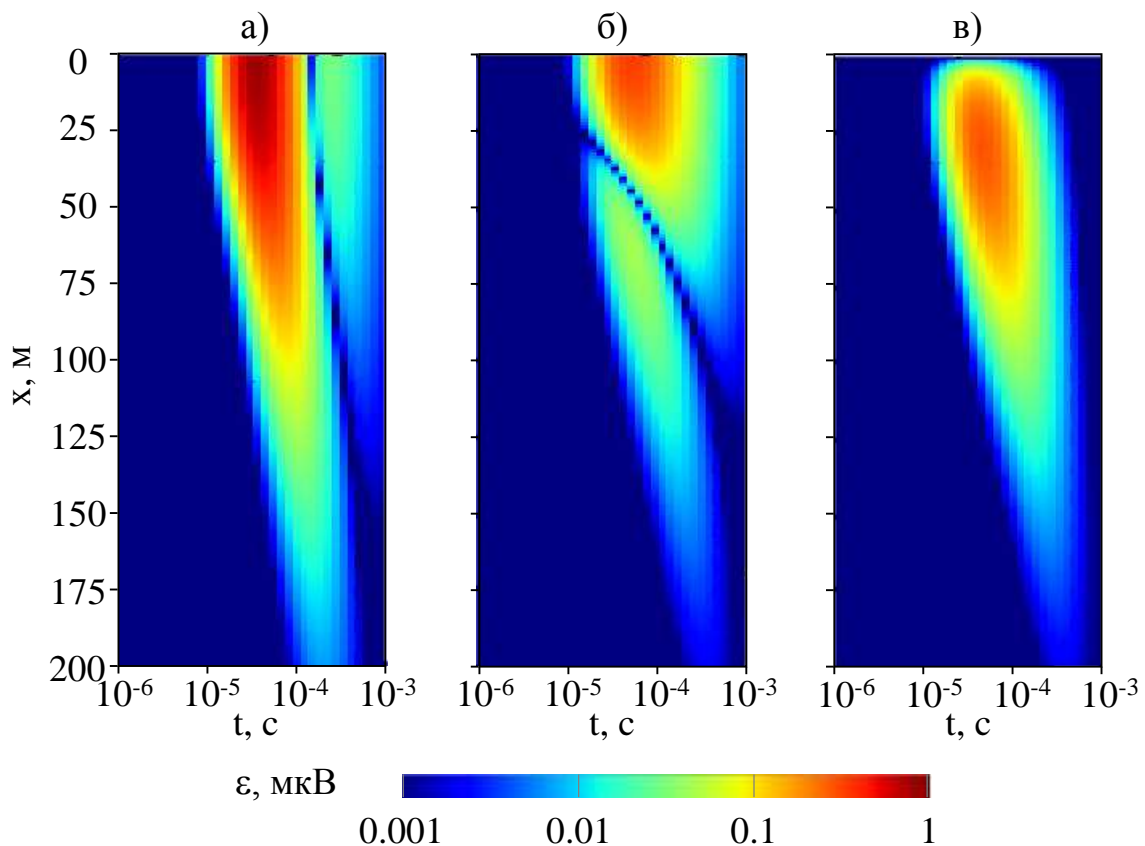


Э.д.с. (мкВ) для ХХ- (а), ZZ- (б) и ZX- (в) компонент в зависимости от времени и от положения зонда вдоль траектории при импульсном электромагнитном зондировании баженовской свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС<sub>1</sub>.

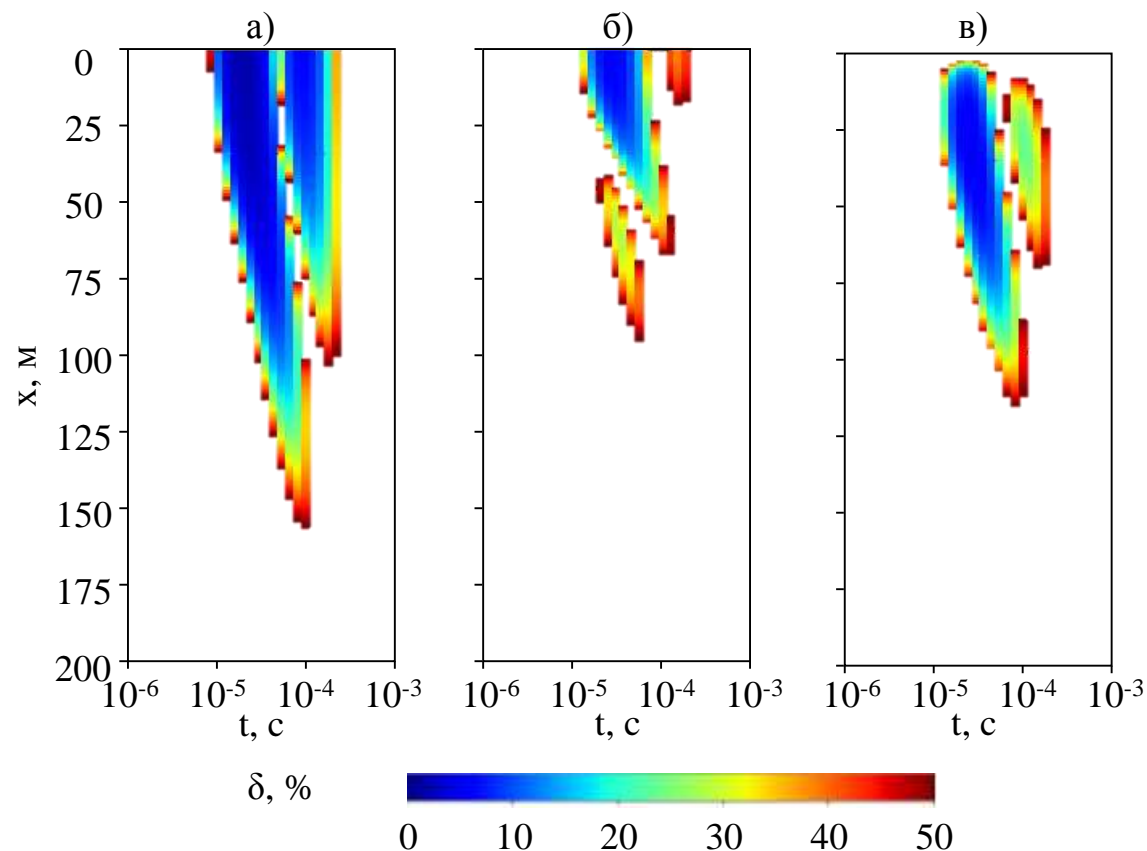


Относительная ошибка определения положения подошвы баженовской свиты для ХХ- (а), ZZ- (б) и ZX- (в) компонент поля в зависимости от времени и от положения зонда вдоль траектории при импульсном электромагнитном зондировании свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС<sub>1</sub>.

# Импульсное электромагнитное просвечивание с системой скважин с горизонтальным завершением в коллекторах БС<sub>22</sub> и ЮС<sub>1</sub>

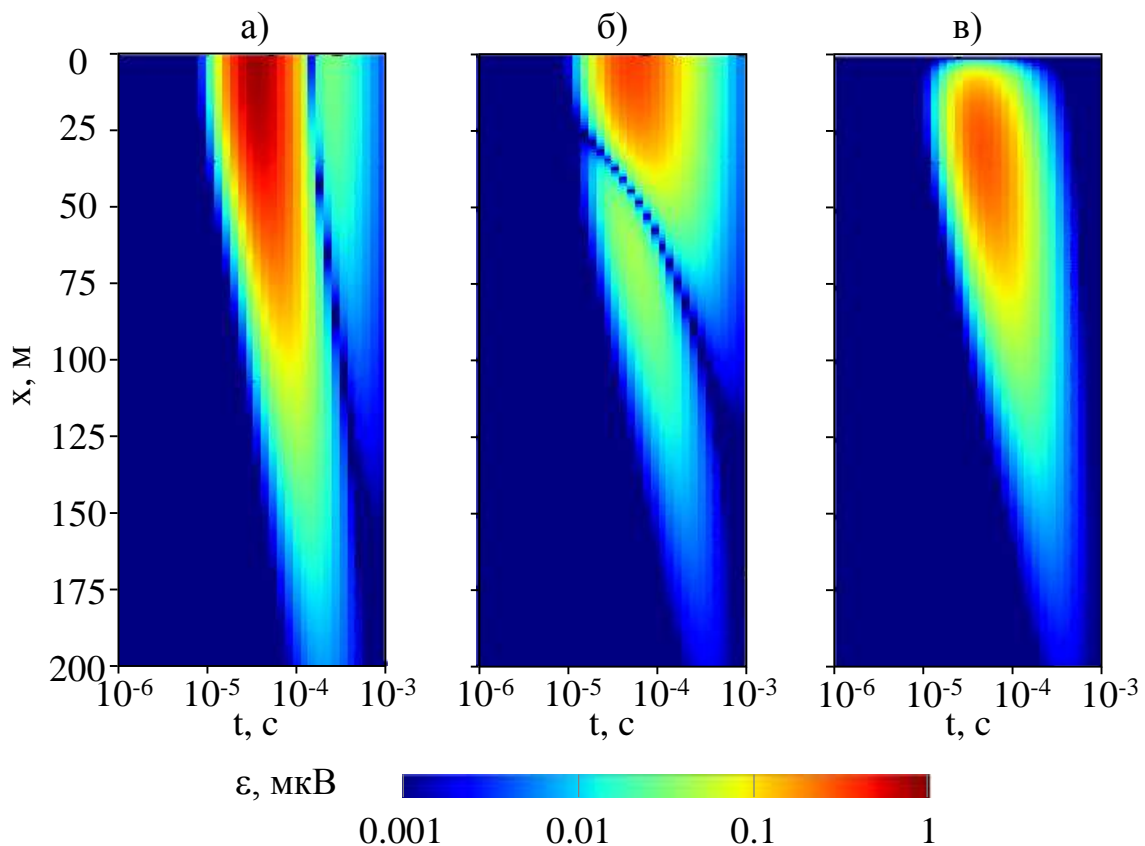


Э.д.с. для YY- (а), ZZ- (б), и XZ-компонент (в) поля в зависимости от времени и от горизонтального расстояния между источником и приемником, расположенных в скважинах с горизонтальным завершением в пластах-коллекторах БС<sub>22</sub> и ЮС<sub>1</sub>, при импульсном электромагнитном межскважинном просвечивании ЮС<sub>0</sub>.

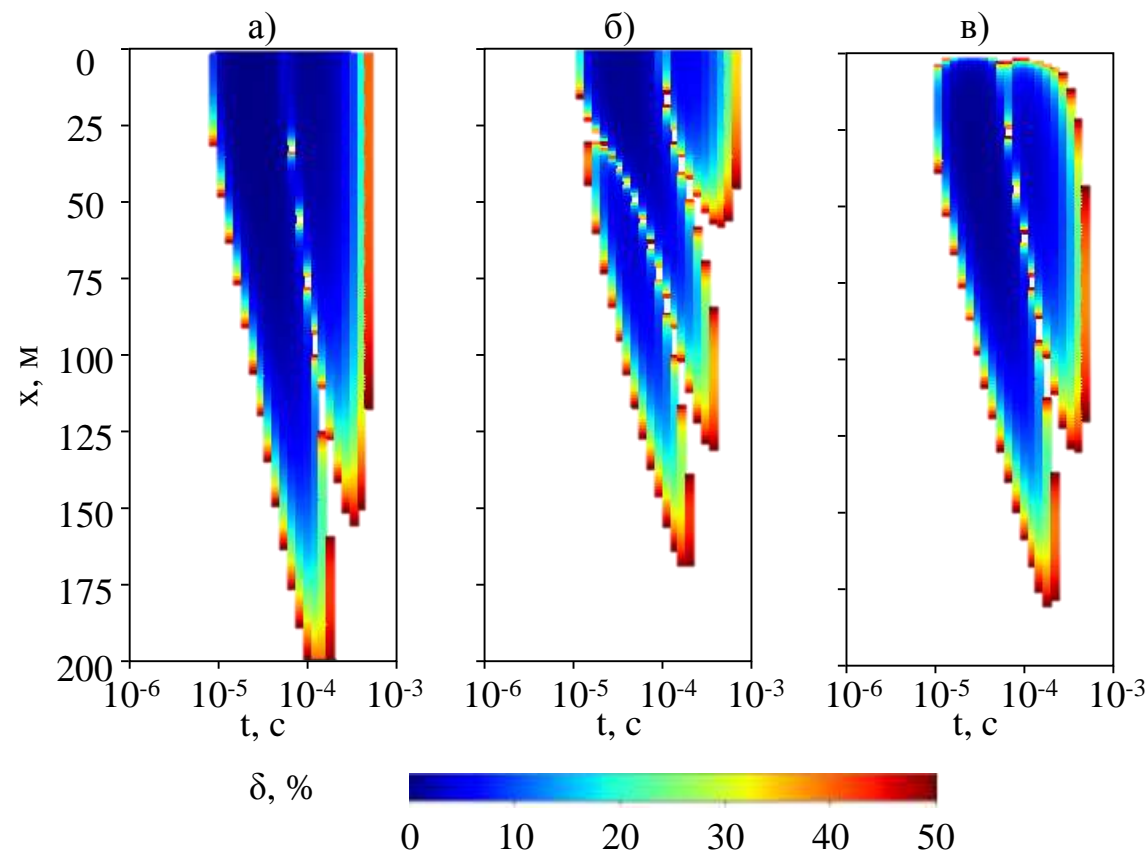


Относительная ошибка определения положения кровли баженовской свиты для YY- (а), ZZ- (б), и XZ-компонент (в) поля в зависимости от времени и от горизонтального расстояния между источником и приемником, расположенных в скважинах с горизонтальным завершением в пластах-коллекторах БС<sub>22</sub> и ЮС<sub>1</sub>, при импульсном электромагнитном межскважинном просвечивании ЮС<sub>0</sub>.

# Импульсное электромагнитное просвечивание с системой скважин с горизонтальным завершением в коллекторах БС<sub>22</sub> и ЮС<sub>1</sub>



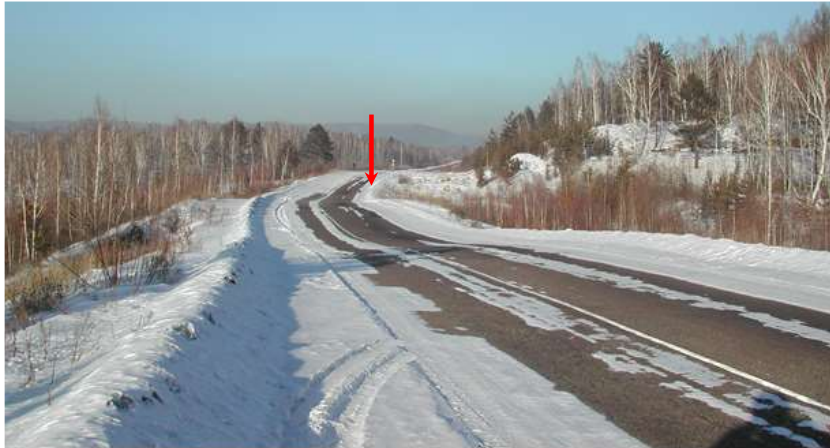
Э.д.с. для YY- (а), ZZ- (б), и XZ-компонент (в) поля в зависимости от времени и от горизонтального расстояния между источником и приемником, расположенных в скважинах с горизонтальным завершением в пластах-коллекторах БС<sub>22</sub> и ЮС<sub>1</sub>, при импульсном электромагнитном межскважинном просвечивании ЮС<sub>0</sub>.



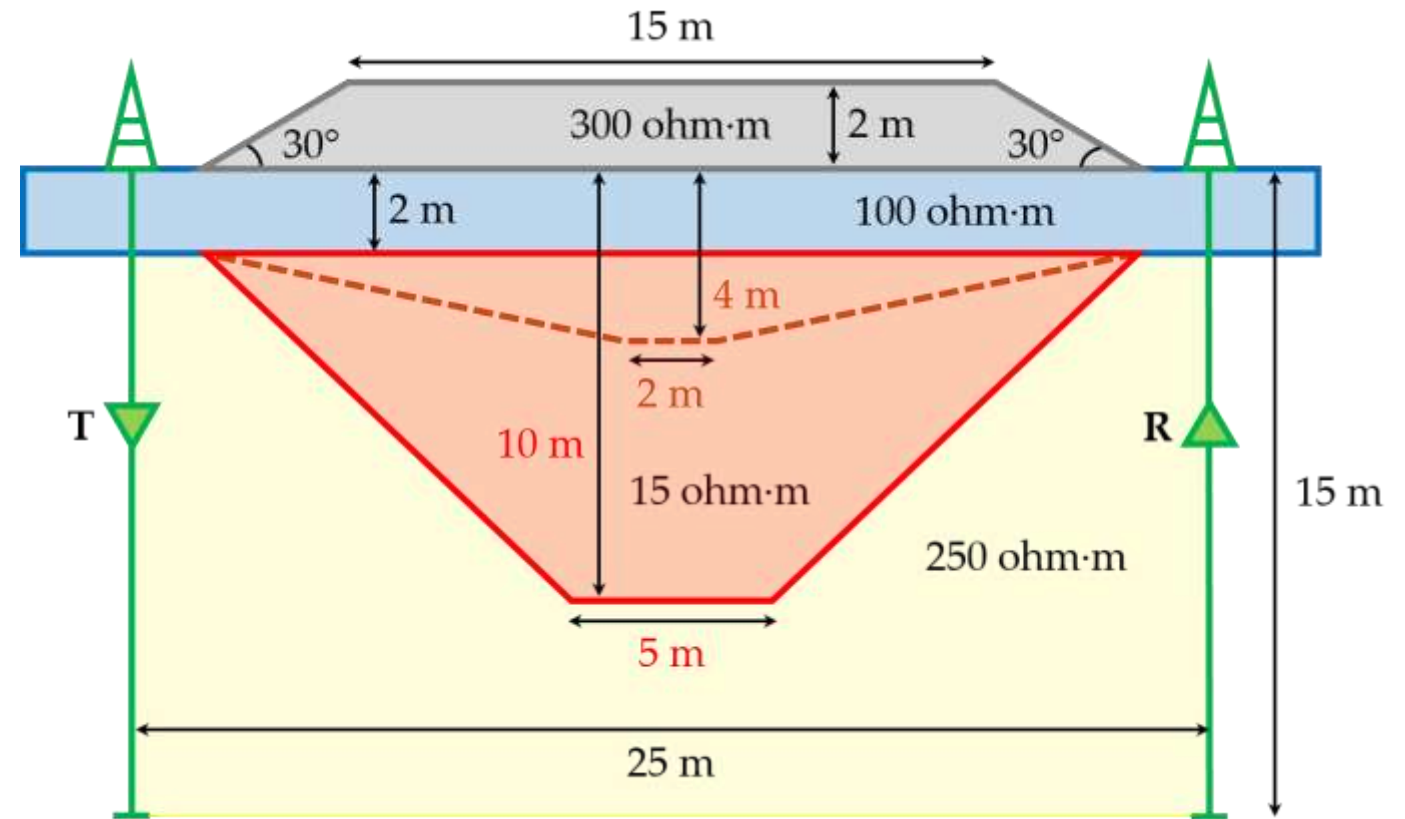
Относительная ошибка определения положения подошвы баженовской свиты для YY- (а), ZZ- (б), и XZ-компонент (в) поля в зависимости от времени и от горизонтального расстояния между источником и приемником, расположенных в скважинах с горизонтальным завершением в пластах-коллекторах БС<sub>22</sub> и ЮС<sub>1</sub>, при импульсном электромагнитном межскважинном просвечивании ЮС<sub>0</sub>.



# Изучение и мониторинг криолитозоны

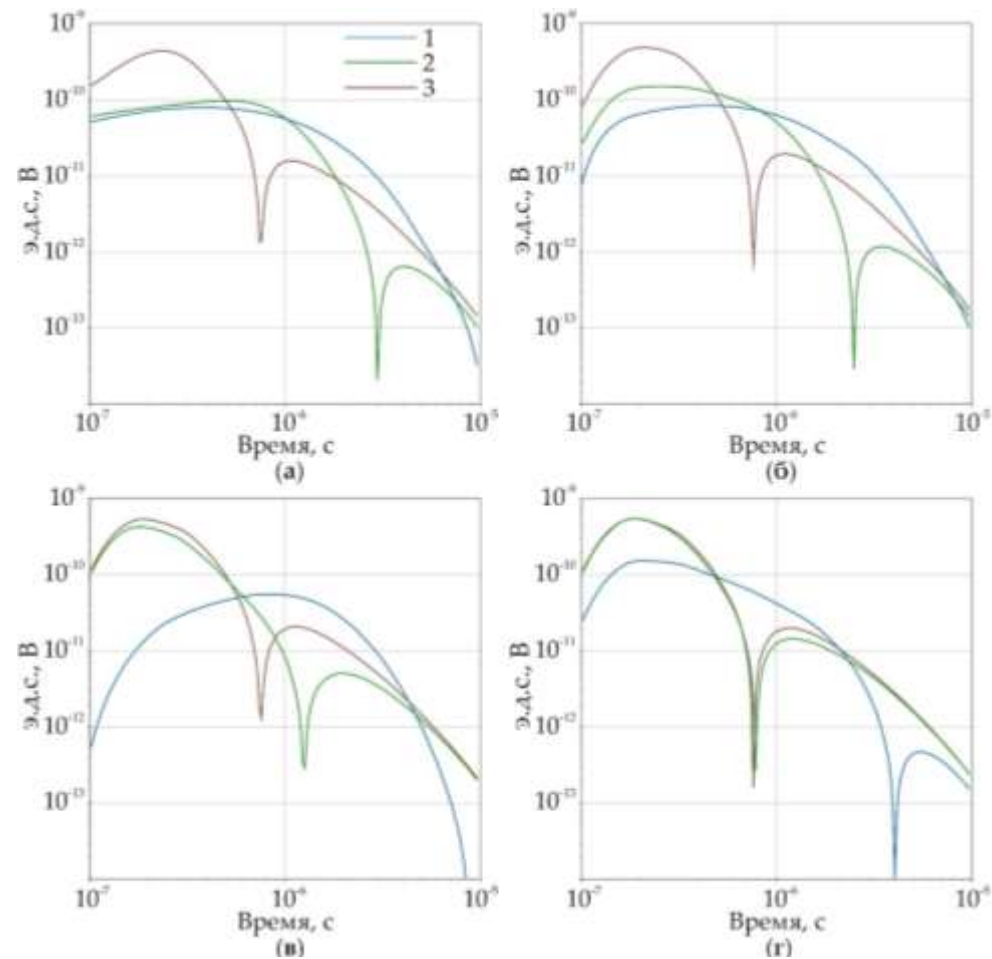


Деформирующийся участок федеральной автотрассы «Чита-Хабаровск»

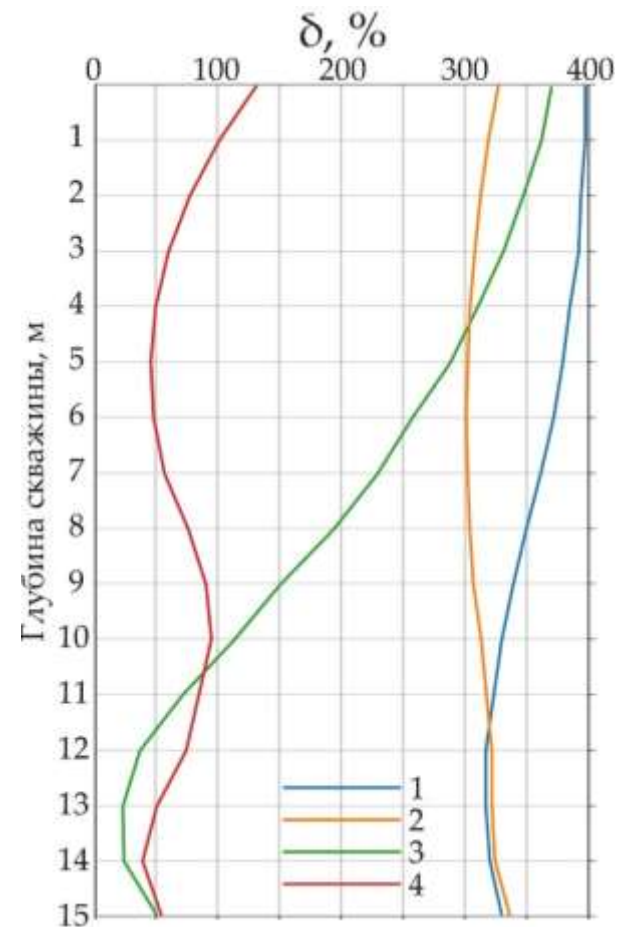


Реалистичная геоэлектрическая модель элемента дороги с тающей вечной мерзлотой и применяемая геофизическая установка межскважинного просвечивания (в разрезе). Серый – дорожное полотно с насыпью, синий – сезонно-оттаивающий слой, жёлтый – вечная мерзлота, красный – талики, зелёный – скважины

# Трёхмерное моделирование векторным МКЭ



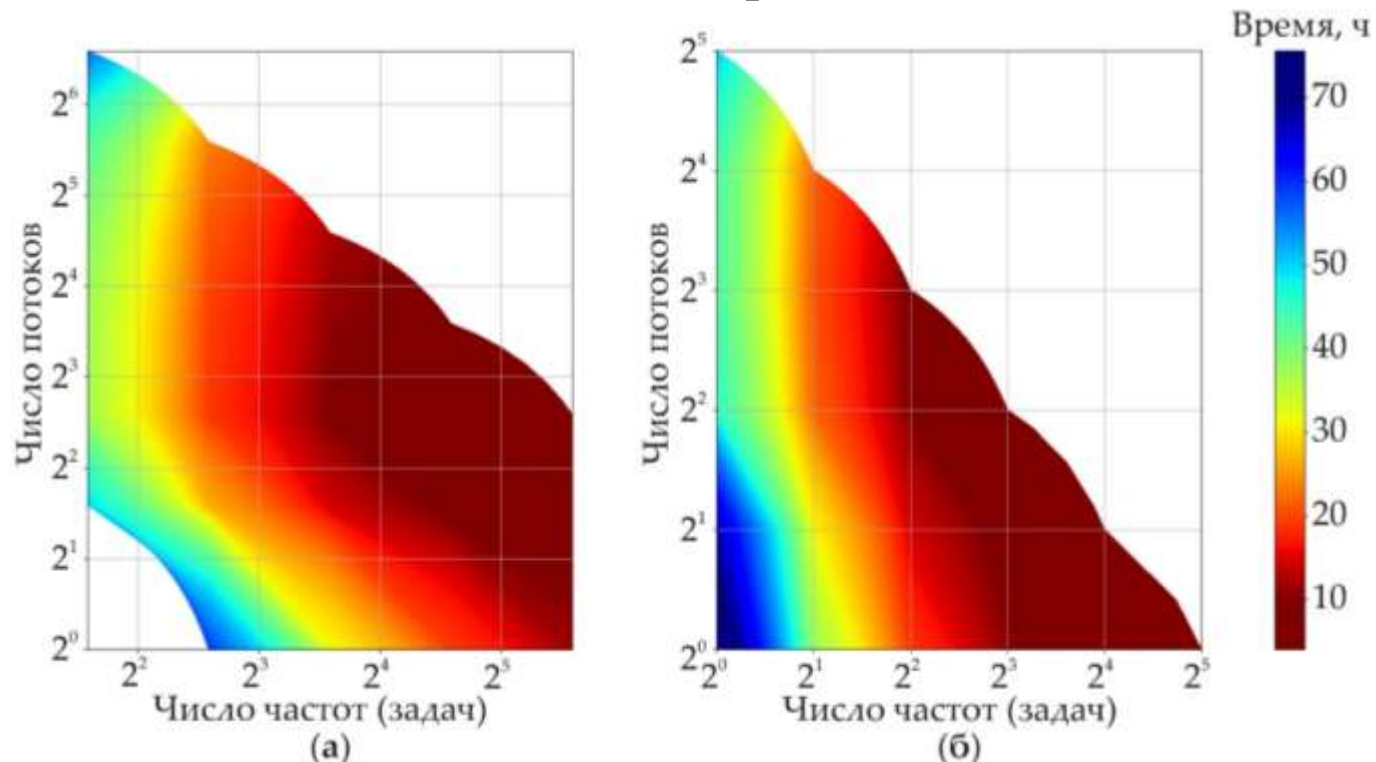
Изменения во времени ЭДС в приёмной катушке на четырёх характерных глубинах: (а) – 1 м, (б) – 5 м, (в) – 10 м, (г) – 15 м. 1 – референтная модель, 2 – малый талик, 3 – большой талик. Источник и приёмник – напротив друг друга.



Предложенная система импульсного электромагнитного межскважинного просвечивания высокочувствительна как к наличию талика под автодорогой, так и к его размерам.

Относительные разности (%) между ЭДС в референтной модели и с таликом на временах  $t_1 = 2 \cdot 10^{-7}$  с и  $t_2 = 10^{-6}$  с: 1 – малый талик при  $t_1$ , 2 – большой талик при  $t_1$ , 3 – малый талик при  $t_2$ , 4 – большой талик при  $t_2$ .

# Анализ производительности вычислений



**KNL:** Наилучшая производительность при использовании всех 288 аппаратных потоков (параллельно для 48 частот, операции матричного умножения выполняются на 8 потоках).

**Broadwell:** Наилучшая производительность при использовании всех 32 аппаратных потоков (параллельно для 32 частоты, операции матричного умножения выполняются на 1 потоке).

**Для обоих типов узлов** оптимально, если есть возможность, использовать 8 потоков при распараллеливании операций матрично-векторного умножения.

Результаты анализа производительности алгоритма моделирования процесса зондирования с импульсным источником тока: (а) на узлах KNL; (б) на узлах Broadwell.

Характеристика	KNL	Broadwell
CPU	1 × Intel Xeon Phi 7290 (1.5 ГГц, 72 ядра × 4 потока)	2 × Intel Xeon E5-2697v4 (2.6 ГГц, 16 ядер × 2 потока)
Число аппаратных потоков	288	32
Оперативная память	96 Гб	128 Гб
Пиковая производительность	3456 ГФлопс	1331.2 ГФлопс

Высокопроизводительные вычисления проводятся на базе Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН

# Заключение

- Для обоснования метода импульсных электромагнитных зондирований применительно к изучению геологической среды разработаны программно-алгоритмические средства моделирования сигналов и оценки разрешающей способности системы наблюдений.
- Анализ результатов моделирования и оценки чувствительности свидетельствует о перспективности метода для картирования объектов и прослеживания латеральных неоднородностей как при каротаже скважин, так и при межскважинном просвечивании.
- Установлены возможности импульсных электромагнитных зондирований применительно к изучению уникальной баженовской свиты и мониторинга криолитозоны.
- Оптимальное проектирование и обоснование конфигураций зондирующих установок с импульсом тока заданной формы выполнено на основе масштабного численного моделирования с использованием Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН.